УДК 622.323:
550.3

Е.А. Вознесенский, Н.А. Пустовойтова

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ НЕРАСТВОРИТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ РАЗМЫВА ПОДЗЕМНОЙ ЕМКОСТИ В СОЛЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Приведен обзор существующих методов контроля уровня нерастворителя в строящейся подземной емкости. К таким методам относятся: геофизический, подбашмачный, контрольного отверстия, «нулевой», манометрический и стационарных датчиков. В качестве наиболее перспективного выбран термометрический метод контроля. В процессе моделирования методом конечных элементов изменения температурного градиента в выработке-емкости в зависимости от глубины и от используемых видов нерастворителя (дизельным топливом или воздухом), рассчитаны зависимости разностей температур в жидкости и массиве от координаты при различных нерастворителях и на различных расстояниях между точками измерения. Показана возможность определения границы между рассолом и нерастворителем (дизельным топливом или воздухом) при создании подземных хранилищ углеводородов в соляных отложениях. Для дизельного топлива в качестве нерастворителя разница температур при ее измерении в двух точках на расстояниях 2,50 и 1,25 м составляет 0,10 и 0,17 °К, а для воздуха 0,40 и 0,25 °К. В качестве перспективной измерительной системы для регистрации градиента температуры по глубине скважины можно рекомендовать оптоволоконную систему измерения, точность абсолютных измерений температуры которой находится в пределах от 0,08 до 3 °К, а дискретность измерения разности температур при математической обработке может доходить до 0,02 °К, что достаточно для надежного определения положения границы.

Ключевые слова: подземные хранилища газа, строительство подземных хранилищ углеводородов, контроль уровня нерастворителя, моделирование, термометрический метод.

Введение

Подземные хранилища природного газа используются для регулирования неравномерности газопотребления, в первую очередь для покрытия пиковых нагрузок.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 167–174.
© 2016. Е.А. Вознесенский, Н.А. Пустовойтова.

Для строительства выработок-емкостей используется принцип циркуляционного воздействия воды на растворяемую поверхность соли. Для создания определенной формы и размеров выработки-емкости процессом растворения управляют путем закачки в нее нерастворителя. Он служит для изоляции потолочины и других участков поверхности каменной соли в верхней части выработки, растворение которых на данном этапе создания выработки нежелательно. В качестве нерастворителя обычно используют нефтепродукты, природный, инертный газ или воздух.

При закачке нерастворителя одним из основных вопросов является определение его уровня в емкости, т.е. пространственного положения границы «рассол-нерастворитель». Существуют несколько методов определения этого уровня [1]: геофизический, подбашмачный, контрольного отверстия, «нулевой», манометрический, стационарных датчиков.

Одним из возможных путей решения задачи по определению уровня нерастворителя является точное измерение температуры по глубине емкости. Тепло Земли, поднимаясь от ее центра к поверхности, создает разность температур, которая при одинаковом расстоянии по высоте между двумя точками измерения будет тем больше, чем меньше теплопроводность среды. Рассмотрим возможность регистрации уровня нерастворителя с помощью современных измерительных приборов, а также необходимую точность определения границы «рассол-нерастворитель».

Моделирование изменения температурного градиента в выработке-емкости в зависимости от глубины и от используемых видов нерастворителя

Описание модели

Тепловой поток из земных недр и температурный градиент связаны между собой соотношением

$$q = \lambda \nabla T,$$

где q – тепловой поток из земных недр; λ – коэффициент теплопроводности; ∇T – градиент температуры. Тепловой поток q, идущий из глубины и исходящий затем с поверхности Земли, равен $6{,}2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м^2 [2]. Поскольку емкость вносит возмущения в равномерное поле Земли, измерение температурного градиента вдоль вертикальной оси скважины и выработки позволит обнаружить границу между нерастворителем и рассолом.

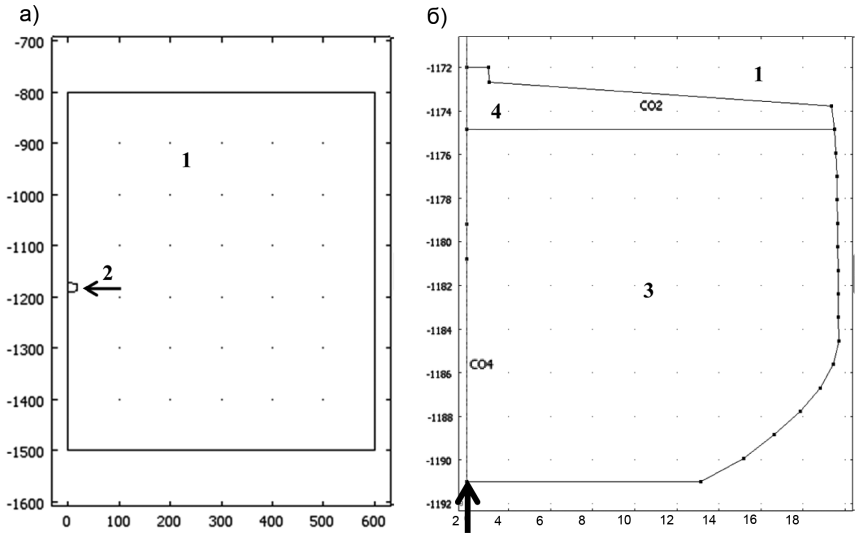

Рис. 1. Схема расчетной модели (а) и увеличенная схема емкости в массиве (б): 1 – порода, 2 – емкость, 3 – рассол, 4 – нерастворитель

Проведем с помощью моделирования методом конечных элементов расчет температурного градиента и разности температур между двумя точками термозонда, используемого для измерений на натурных объектах.

Геометрия модели

Задача решается в двумерной осесимметричной постановке Axial symmetry (2D). Расчетная геометрическая схема модели приведена на рис. 1. Модель части массива пород с емкостью имеет высоту 700 м и половину ширины 600 м. В верхней части емкости выделена область (4), моделирующая нерастворитель.

Основным используемым параметром в модели является коэффициент теплопроводности, значения которого для различных элементов модели приведены в таблице.

Значения теплопроводности элементов модели

Параметр	Единица измерения	Подобласть			
		1 (каменная соль [3])	2 (рассол [4])	4 (топливо дизельное [3])	4 (воздух [5] p = 15 МПа, T = 300 К)
Коэфф. теплопроводности	Вт/(м·К)	1,7...3,6...5,5	0,573	0,12...0,11	$34{,}9 \cdot 10^{-3}$

Результаты моделирования

Результаты расчета представлены на рис. 2–4. Кривая, представленная на рис. 2, показывает, что температурный градиент на границе между рассолом и нерастворителем достагает 0,15 К.

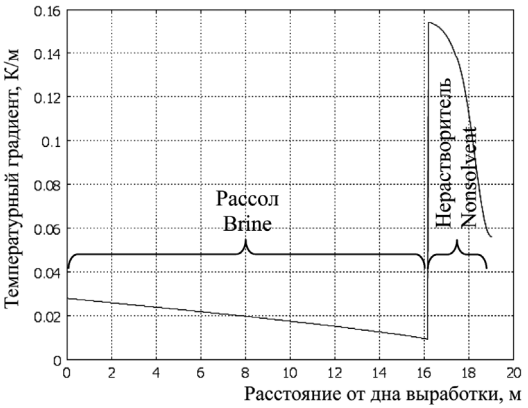

Рис. 2. График изменения температурного градиента в зависимости от расстояния от отсчетной точки, расположенной на нижней границе емкости, по направлению вверх и показанной стрелкой на рис. 1 (б)

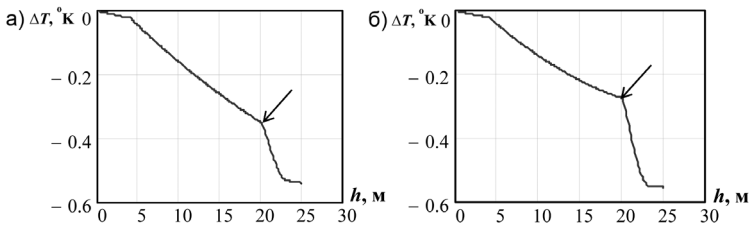

Рис. 3. График зависимости разности между температурой на дне выработки и температурой в точке расположенной на оси емкости, стрелкой отмечен контакт рассола и дизельного топлива (а), рассола и воздуха (б)

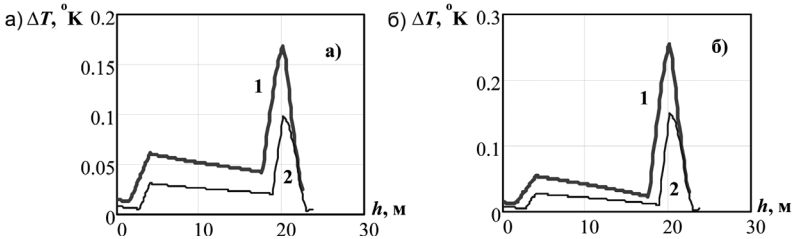

Рис. 4. Зависимость разности температур в жидкости и массиве от координаты при расстояниях между точками измерения 2,50 м (1) и 1,25 м (2) с дизельным топливом (а) и воздухом (б) в качестве нерастворителя

Для определения на практике градиента температур необходимо провести измерения в двух точках, находящихся друг от друга на некотором расстоянии. На рис. 3 представлен график зависимости разности температур между температурой на дне выработки и температурой в точке, расположенной на оси емкости. Стрелкой отмечен контакт рассола и дизельного топлива (рис. 3, *а*), рассола и воздуха (рис. 3, *б*).

На рис. 4 показаны два графика зависимости разности температур в жидкости и массиве от координаты при расстояниях между точками измерения 2,50 м (1) и 1,25 м (2) с дизельным топливом (рис. 4, *а*) и воздухом (рис. 4, *б*) в качестве нерастворителя.

Обсуждение результатов и практическая реализация метода

Зависимости, показанные на рис. 4 могут быть получены при измерении зондом с двумя преобразователями температуры, расположенными на разных высотах. Как следует из этих графиков, граница между жидкостями может быть определена достаточно точно, но при условии малого шага измерения температуры по высоте.

Кроме того, из-за незначительной разности температур ее значения должны быть измерены с точностью до 0,01...0,005 К. Следует заметить, что речь в данном случае идет не об измерении абсолютных значений температуры, а разности температур, которая может быть измерена с более высокой точностью.

В настоящее время наиболее перспективным является использование распределенных в пространстве волоконно-оптических систем для измерения температуры. Метод основан на регистрации изменений параметров лазерного излучения в волоконно-оптическом кабеле, распределенном по стволу скважины, связанных с температурными неоднородностями внутрискважинной среды [6]. Разрешающая способность по координате такого метода измерений около 1 м, опционально 0,5 и 0,25 м при длине кабеля 12 км. Разрешающая способность по температуре менее 0,1 К. В [7] при описании измерения температуры в скважине глубиной до 1300 м при закачке теплой и холодной воды указывается точность абсолютных измерений ±0,5 К. Относительно точности измерения разности температур не сообщается. В [8] проведен анализ распределенных датчиков на основе оптических волокон. Не вдаваясь в подробности конкретных вариантов измерения, отметим только,

что погрешность распределенных устройств измерения температуры, построенных на различных принципах, находится в пределах от 0,08 до 3 °К.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается оптический кабель и аппаратура, позволяющие производить такие дистанционные измерения температуры [9]. При диапазоне измерений (длине кабеля) до 30 км пространственное разрешение 1 м, температурное разрешение 0,1 °К, точность измерения температуры ±0,5 °К, при калибровке 0,1 °К, длительность измерения от 3 с. Система используется в нефтяной и газовой промышленностях. В [10] описана волоконно-оптическая система термометрии для применения в скважинах. Погрешность измерения абсолютного значения температуры здесь достаточно велика и составляет ±1 °К. В то же время, при дополнительной математической обработке данных возможно получить разрешающую способность по разности температур 0,02 °К, что может удовлетворить заданным требованиям измерения градиента температуры в скважине, указанным выше.

Заключение

Показана возможность определения термометрическим методом границы между рассолом и нерастворителем (дизельным топливом или воздухом) при создании подземных хранилищ углеводородов в соляных отложениях. Для дизельного топлива в качестве нерастворителя разница температур при ее измерении в точках на расстояниях 2,50 и 1,25 м составляет 0,10 и 0,17 К, а для воздуха 0,4 и 0,25 К соответственно.

В качестве перспективной измерительной системы для регистрации градиента температуры по глубине скважины можно рекомендовать волоконно-оптическую систему измерения, точность абсолютных измерений температуры которой находится в пределах от 0,08 до 3 °К, а дискретность измерения разности температур при математической обработке может доходить до 0,02 °К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов В. И.* Строительство подземных газонефтехранилищ: Учебн. пособие для вузов. – М.: Газойл пресс, 2000. – 250 с.

2. *Жарков В. Н.* Внутреннее строение Земли и планет.– М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы.– 1983.–416 с.

3. *Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др.* Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат. – 1232 с.

4. *Назинцев Ю. Л., Панов В. В.* Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 2000. – 83 с.

5. *Варгафтик Н. Б.*, *Филиппов Л. П.*, *Тарзиманов А. А.*, *Тоцкий Е. Е.* Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

6. *Handbuch* zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten / BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1997. Bd. 3. Geophysik / Klaus Knödel et al. 1997. – 1063 p.

7. *Bücker C., Großwig S., Hurtig E., Rembe M., Stadt N.* Prozessabläufe im Speicherbereich bei der Injektion von Flüssigkeiten in Bohrungen – Messung und Simulation // DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2015, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung. – Celle, 22./23. April 2015. DGMK-Tagungsbericht 2015-1, ISBN 978-3-941721-55-2.

8. *Xiaoyi Bao and Liang Chen*. Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors // Sensors. – 2012. – 12. – p. 8601–8639.

9. Распределенный датчик температуры DTS [Электронный ресурс] / Информационный материал фирмы Optical Path [сайт]. URL http://opticalpath.ru/ (дата обращения 10.07.2015).

10. Решения для нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс] / Информационный материал фирмы ООО «Седатэк» [сайт]. URL http://www.sedatec.org/ru/industry/863932/ (дата обращения 10.07.2015). ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вознесенский Е.А.[1] – кандидат технических наук,
заместитель начальника отдела технической диагностики,
e-mail: e.voznesenskiy@gazpromgeotech.ru,
Пустовойтова Н.А.[1] – кандидат технических наук,
начальник отдела технической диагностики,
e-mail: n.pustovoitiva@gazpromgeotech.ru,
[1] ООО «Газпром геотехнологии».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 167–174.

UDC 622.323: 550.3

E.A. Voznesenskiy, N.A. Pustovoytova

JUSTIFICATION OF THERMOMETRIC CONTROL METHODS OF SOLVENTS IN THE ROOF OF UNDERGROUND STORAGE IN SALT CAVERNS

The article reviewed the existing methods of nonsolvent level control in the process of building an underground cavern. Among those are geophysical method, sub-shoe method, level hole method, initial level method, manometric technique, stationary sensors method. Geothermal surveying method is the advanced one. The thermal change simulation in the cavern storage depending on depth and different types of nonsolvent (diesel, air) was performed

by finite elements method. Temperature difference dependence on coordinate in case of different nonsolvents and at different distances between measuring points in cavern was calculated. Also the possibility of brine and nonsolvent (diesel, air) interface determination was demonstrated. For diesel nonsolvent the temperature difference at 2.50 m and 1.25 m distance in two points is 0.10 °C and 0.17 °K, for air 0.40 °K and 0.25 °K, respectively. Fiber-optic measurement system for temperature gradient data acquisition in depth of borehole can be recommended as an advanced one. The accuracy of measurements vary from 0.08 °K to 3 °K, the measurement resolution of the temperature difference with the mathematical processing can reach 0.02 °K which is sufficient for the reliable determination of the boundary position.

Key words: underground gas storages, underground hydrocarbons storages construction, nonsolvent level control, simulation, geothermal surveying method.

AUTHORS

Voznesenskiy E.A.[1], Candidate of Technical Science,
Deputy Head of Technical Diagnostics,
e-mail: e.voznesenskiy@gazpromgeotech.ru,
Pustovoytova N.A.[1], Candidate of Technical Science,
Head of Department of Technical Diagnostics,
e-mail: n.pustovoitiva@gazpromgeotech.ru,
[1] «Gazprom geotechnology» LLC, 123290, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Smirnov V. I. *Stroitel'stvo podzemnykh gazoneftekhranilishch: Uchebnoe posobie dlya vuzov* (Строительство подземных газонефтехранилищ, Higher educational aid), Moscow, Gazoyl press, 2000, 250 p.

2. Zharkov V. N. *Vnutrennee stroenie Zemli i planet* (Внутреннее строение Земли и планет), Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury. 1983, 416 p.

3. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Meylikhova (Физические величины: Handbook. Grigor'ev I. S., Meylikhov E. Z. (Eds.)), Moscow, Energoatomizdat, 1232 p.

4. Nazintsev Yu. L., Panov V. V. *Fazovyy sostav i teplofizicheskie kharakteristiki morskogo l'da* (Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда), Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000, 83 p.

5. Vargaftik N. B., Filippov L. P., Tarzimanov A. A., Totskiy E. E. *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostey i gazov* (Справочник по теплопроводности жидкостей и газов), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 352 p.

6. *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1997. Bd. 3. Geophysik / Klaus Knödel et al. 1997. 1063 p.

7. Bücker C., Großwig S., Hurtig E., Rembe M., Stadt N. *Prozessabläufe im Speicherbereich bei der Injektion von Flüssigkeiten in Bohrungen Messung und Simulation*.DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2015, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung. Celle, 22./23. April 2015. DGMK-Tagungsbericht 2015-1.

8. Xiaoyi Bao and Liang Chen. Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*. 2012. 12. p. 8601–8639.

9. *Raspredelennyy datchik temperatury DTS. Informatsionnyy material firmy Optical Path*. http://opticalpath.ru/ (accessed: 10.07.2015).

10. *Resheniya dlya neftegazovoy promyshlennosti. Informatsionnyy material firmy OOO «Sedatek»*. http://www.sedatec.org/ru/industry/863932/ (accessed: 10.07.2015).