

Прохоров А.Е., Плехов О.А. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 129-137. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.11

Prokhorov A.E., Plekhov O.A. A System Development for Monitoring Kinetic Parameters of a Phase Transition in a Fluid-Saturated Soil Based on Fiber Optic Sensors. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 129-137. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.11



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.11

УДК 53.072.8

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЙ ВО ВЛАГОНАСЫЩЕННОМ ГРУНТЕ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА НА БАЗЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ

А.Е. Прохоров, О.А. Плехов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 11 февраля 2019 г.

Принята: 22 марта 2019 г.

Опубликована: 30 марта 2019 г.

Ключевые слова:

решетки Брэгга, волоконно-оптические датчики, фазовый переход, пористый грунт, напряженно-деформированное состояние, температурная компенсация.

АННОТАЦИЯ

Использование волоконно-оптических датчиков (ВОД) является актуальным направлением развития различных областей науки и техники. Применение ВОД с чувствительным элементом (брэгговской решеткой) имеет ряд преимуществ перед стандартными датчиками деформации, температуры, углов наклона. В горнодобывающей промышленности ВОД, как правило, используются для мониторинга температур в процессе возведения ледопородного ограждения, для анализа возникновения изгибов при проходке шахтных стволов или при забивании свай. Авторский коллектив имеет опыт использования оптоволоконных датчиков для контроля масштабных горнотехнических объектов. Как известно, процесс оттаивания и замораживания пористых сред сопровождается эффектами массо- и теплопереноса, формированием криогенных течений, изменением напряженно-деформированного состояния среды. Поэтому актуальным является вопрос разработки лабораторной оптоволоконной системы мониторинга, позволяющей регистрировать температурные и деформационные особенности фазового перехода в пористой среде.

В статье представлена разработка системы анализа напряженно-деформированного состояния насыщенного влагой пористого грунта в процессе возникновения и движения фазового перехода «вода-лед». Для формирования образца с размещенной в нем волоконно-оптической системой используется разработанная пластиковая форма, изготовленная методом 3D-печати. Для анализа кинетических параметров фазового перехода и напряженно-деформированного состояния грунта используются волоконно-оптические датчики температуры и деформации. В работе рассматриваются методы компенсации температурных деформаций, влияющих на показания датчиков механической деформации породы и деформационного влияния на датчики температуры. Рассматриваются методы создания системы с продвигающимся фазовым переходом для анализа кинетических особенностей системы «вода-лед/лед-вода». Исследуются особенности фазового перехода в пористой влагонасыщенной среде.

© ПНИПУ

© Прохоров Александр Евгеньевич – м.н.с., e-mail: prokhorov.a@icmm.ru, ID: [0000-0002-6511-2105](https://orcid.org/0000-0002-6511-2105)

Плехов Олег Анатольевич – д.ф.-м.н., e-mail: poa@icmm.ru, ID: [0000-0002-0378-8249](https://orcid.org/0000-0002-0378-8249)

Aleksander E. Prokhorov – Junior Researcher, e-mail: Prokhorov.a@icmm.ru, ID: [0000-0002-6511-2105](https://orcid.org/0000-0002-6511-2105)

Oleg A. Plekhov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: Poa@icmm.ru, ID: [0000-0002-0378-8249](https://orcid.org/0000-0002-0378-8249)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

A SYSTEM DEVELOPMENT FOR MONITORING KINETIC PARAMETERS OF A PHASE TRANSITION IN A FLUID-SATURATED SOIL BASED ON FIBER OPTIC SENSORS

A.E. Prokhorov O.A. Plekhov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 11 February 2019

Accepted: 22 March 2019

Published: 30 March 2019

Keywords:

Bragg gratings, fiber optic sensors, phase transition, porous soil stress-strain state, temperature compensation.

ABSTRACT

The use of fiber-optic sensors (FBG) is a promising direction of developing various science and technology fields. Bragg grating has a number of advantages over standard sensors of deformation, stress, temperature, angles of inclination. In the mining industry, FBG are typically used to monitor temperatures during the construction of an ice barrier, to analyze the occurrence of bends in the sinking of mine shafts or when driving piles. As it is known, the process of thawing and freezing of porous media is accompanied by the effects of mass and heat transfer, the formation of cryogenic flows, changes in the stress-strain state of a medium. Therefore, it is important to develop a laboratory fiber-optic monitoring system to record the temperature and deformation characteristics of the phase transition in a porous medium.

In this paper we develop a system analyzing the stress-strain state of porous soils saturated with moisture in the process of occurrence and movement of the phase transition between water and ice. For the formation of a sample with the fiber-optic system placed therein, we used a designed plastic form is used which had been 3D printed. For the analysis of the kinetic parameters of the phase transition and the stress-strain state of the soil, the optical-fiber temperature and strain sensors are used. The paper deals with the compensation methods of temperature deformation on the sensors of mechanical deformation of the rock and the deformation effect on the temperature sensors. Methods of creating a system with a linearly advancing phase transition for the analysis of the kinetic features of the water-ice/ice-water system are considered. The features of the phase transition in a porous water-saturated medium are investigated.

© PNRPU

Введение

Использование волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток (ВБР) в последнее время широко распространено в области мониторинга критических параметров конструкций различного типа. Датчики ВБР широко применяются в дефектоскопии композиционных материалов [1, 2], в области мониторинга железобетонных конструкций [3], в горнодобывающей отрасли промышленности [4, 5]. Интерес к данной технологии вполне обоснован, датчики позволяют проводить измерения для расчета деформации, напряжения, температуры, проводить инклинометрию [6–8]. По сравнению с традиционными датчиками деформации, напряжения и др. датчики ВБР отличаются рядом преимуществ, таких как малый размер, малый вес, отсутствие влияния электромагнитных полей на показания датчиков, высокая скорость передачи данных [4].

В горнодобывающей промышленности датчики ВБР активно используются для мониторинга температур в процессе возведения ледопородного ограждения [9], для анализа возникновения изгибов при проходке шахтных стволов или при забивании свай [10–13]. Как правило, мониторинговые системы требуют дополнительных моделей или эмпирических соотношений для анализа текущей ситуации и оценки состояния ледопородного ограждения. Эмпирические соотношения позволяют

достаточно просто оценить текущее состояние конструкции, но при этом обладают значительным коэффициентом запаса [14]. Математические модели имеют существенно больший прогностический потенциал, но требуют усилий по верификации материальных функций и кинетических параметров исследуемых процессов. Процесс оттаивания и замерзания влаги в пористой среде сопровождается эффектами массо- и теплопереноса, формированием криогенных течений, изменением напряженно-деформированного состояния среды. В результате актуальным становится вопрос разработки новой элементной базы для лабораторной системы мониторинга, позволяющей регистрировать температурные и деформационные особенности фазового перехода в пористой среде.

Большой вклад в развитие исследований особенностей протекания фазового перехода в пористой среде внесли авторы работ [14–17]. Ранние исследования формирования мерзлых грунтов пренебрегали процессами массопереноса. В работах [18–19] показано, что незамерзшая вода играет ключевую роль в процессе формирования мерзлого грунта. Современные исследования показывают, что равновесное содержание незамерзшей воды зависит от температуры и имеет нелинейный характер. Большое число последующих работ [20–23] было посвящено исследованию вопросов переноса влаги в замерзающих почвах.

Таким образом, при анализе процесса замерзания влагонасыщенных грунтов с достаточными источниками влаги необходимо учитывать как изменение влажности, так и пучение грунта [24–26]. Одновременная миграция и кристаллизация влаги в области интенсивного фазового перехода может приводить к запаздыванию образования льда. Наиболее важной проблемой при исследовании процессов переноса воды в замерзающем грунте является определение значений материальных параметров.

Несмотря на длительную историю изучения данного вопроса, до сих пор не существует единого мнения о характере процессов, протекающих в ходе замораживания грунта, особенно в зоне фазового перехода, в которой наблюдается одновременное сосуществование льда и воды при температурах от 0 до $-0,6$ °С. Недостаток экспериментальной информации о фундаментальных закономерностях процесса фазового перехода в пористых средах приводит к появлению большого числа различных моделей и теорий образования льда.

Верифицированные модели фазового перехода в пористой среде будут актуальными в процессе контроля потери несущей способности инженерных сооружений и объектов линейной инфраструктуры (дороги, трубопроводы и т.д.) и прогнозирования взаимодействия инженерных сооружений с твердомерзлыми и пластично-мерзлыми грунтами в процессе их эксплуатации.

Целью данной работы является разработка системы мониторинга напряженно-деформированного состояния образца пористой среды в лабораторном масштабе на основе датчиков ВБР в процессе замораживания среды от комнатной температуры до криогенных температур.

1. Описание экспериментальной системы мониторинга фазового перехода в пористой влагонасыщенной среде

Для исследования процесса распространения фронта фазового перехода во влагонасыщенном грунте предлагается испытание образца грунта с внедренными в него волоконно-оптическими линиями измерения температур и линиями измерения деформаций. Схема расположения волоконно-оптических линий с нанесенными на них датчиками приведена на рис. 1.

На схеме датчики деформации, обеспечивающие измерение деформаций в трех взаимно перпендикулярных направлениях, изображены синим, зеленым и желтым цветами. Датчики температуры изображены красным цветом. При подобном расположении датчиков в образце в процессе испытания возможно определение деформаций в различных сечениях образца на различных удалениях от его центра, а также осевых деформаций в различных точках оси. Температурные датчики позволяют зарегистрировать положение фронта фазового перехода в каждый момент времени в процессе испытаний, а также оценить кинетику распространения фронта фазового перехода.

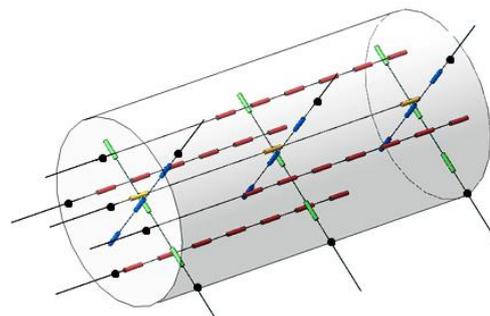


Рис. 1. Схема расположения датчиков в образце

Fig. 1. Arrangement of sensors in the sample

Температурные параметры фронта фазового перехода предлагается регистрировать с помощью корпусированных ВБР-датчиков температуры, последовательно расположенных на волоконно-оптических линиях для минимизации взаимного влияния (исключение температурного моста) по семь штук в линию. Для повышения точности измерений по длине образца грунта датчики выполнены в минимальном размере – 3 мм (в том числе решетка ВБР 2 мм). Корпус датчика при этом исключает влияние деформации брегговской решетки на его показания, имеет наружный диаметр около 1,5 мм и выполнен из медного сплава для увеличения скорости теплопередачи. Для исключения температурного моста между ВБР-датчиками температуры используются вставки из корундовых трубок (Al_2O_3) $\varnothing 3,5 \times 1,5$. Точность измерения температуры лежит в пределах $\pm 0,1$ °С.

Модель волоконно-оптической линии с ВБР-датчиками для измерения температуры приведена на рис. 2.



Рис. 2. Модель волоконно-оптической линии температурных датчиков

Fig. 2. The model of the fiber-optic line of temperature sensors

Неравномерное промерзание грунта в процессе проведения испытаний может вызывать изгиб оптического волокна. Стандартные размеры чувствительных элементов деформационных датчиков 5–10 мм нетривиальным образом отзываются на изгибные деформации,

вызванные данным эффектом. Для уменьшения изгибных сил, действующих на ВБР при проведении исследований, чувствительные элементы деформационных датчиков выполнены малой длины – 1 мм (рис. 3). Датчики деформации имеют погрешность 1 %.

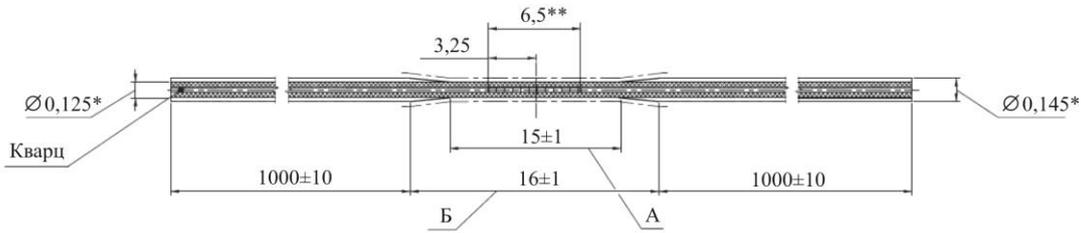


Рис. 3. Эскиз фрагмента волоконной линии с чувствительным ВБР-элементом для проведения испытаний

Fig. 3. The sketch of a fiber line fragment with a FBG sensing element for testing

Скелет измерительной системы располагается в форме, последовательно загружаемой пористым грунтом. Форма изготовлена из пластика методом 3D-печати (рис. 4). Высота каждого кольца составляет 0,02 м, диаметр колец 0,05 м.

контроля процесса замораживания и оценки адекватности показаний температурных датчиков ВБР образец оснащен системой термодпар, расположенных в центрах оснований образца, на середине образующей цилиндра и в центральной точке образца.

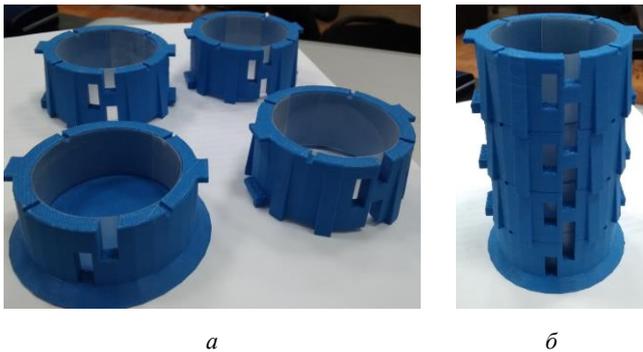


Рис. 4. Форма для замораживания пористого водонасыщенного грунта: разобранная (а); в сборе (б)

Fig. 4. Form for freezing of porous water-saturated soil, disassembled (a), assembled (b)

Форма складывается путем установки колец друг на друга, последовательно заполняясь грунтом, насыщенным водой. Волоконно-оптическая система располагается внутри формы до загрузки грунтом в специальных технологических каналах, которые после наполнения формы убираются. По окончании сборки образца форма оборачивается дополнительным слоем теплоизоляционного материала.

2. Волоконно-оптическая система

Чувствительным элементом волоконно-оптической системы в настоящей работе является решетка Брэгга. Физически это оптическое волокно с системой периодически изменяющихся областей с различными показателями преломления. Максимум спектра отраженной волны от решетки Брэгга может изменяться в зависимости от периода конкретной решетки. Изменения периода решетки могут быть связаны с деформацией волокна, механической и(или) температурной.

Для обеспечения достоверности данных о деформациях, регистрируемых датчиком, необходимо термостабилизировать область измерений или использовать компенсационные методы [27–29].

Вклад температурной и механической деформаций, оказывающих влияние на сдвиг максимума спектра отраженной волны брэгговской решетки, можно записать следующим образом:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta L} + n_{eff} \frac{\delta \Lambda}{\delta L} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + n_{eff} \frac{\delta \Lambda}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (1)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления оптического волокна; Λ – период решетки; L – длина базы измерений; T – температура среды.

Продвижение фронта фазового перехода в процессе замораживания регистрируется следующим образом. Образец в форме помещается в камеру так, что он теплоизолирован со всех сторон кроме одного из оснований, после вся камера охлаждается до температуры существенно меньше температуры равновесного состояния незамороженной влаги в исследуемом грунте. Основные теплопотери происходят через неизолированное основание образца, что обеспечивает продвижение фронта фазового перехода вдоль оси образца. Для

Из уравнения (1) следует, что влияние температурного и деформационного воздействия на показания датчиков ВБР можно разделить математически на основе независимых измерений температуры в области конкретного датчика. Математически процедуру компенсации показаний датчика можно записать в следующем виде:

$$\Delta\lambda_d = \Delta\lambda_c - \Delta\lambda_T, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda_d$ – сдвиг максимума спектра отраженной волны, обеспеченный только механическими деформациями; $\Delta\lambda_c$ – текущие показания сдвига максимума спектра отраженной волны; $\Delta\lambda_T$ – сдвиг максимума спектра отраженной волны при заданной температуре. Для определения значения $\Delta\lambda_T$ для конкретного детектора необходимо провести температурную калибровку зависимости сдвига максимума спектра отраженной волны от температуры среды, в которой находится измерительный детектор.

Задача определения температуры в конкретной точке образца при наличии механических деформаций решения на уровне математической обработки показаний не имеет. Обеспечить объективные показания датчиков температуры на основе брэгговских решеток, при наличии внешних механических деформаций, возможно лишь методом физического исключения влияния деформаций на детектор на этапе разработки измерительного элемента. Наиболее подходящим способом для исключения влияния деформаций на температурные детекторы, по мнению авторов, является помещение детектора в несжимаемый защитный кожух, обеспечивающий хороший тепловой контакт между образцом и детектором. Теплоизоляция соседних детекторов линии друг от друга обеспечивается разрывом кожуха и помещением в разрыв нетеплопроводного материала.

Использование оптоволоконных датчиков для измерения деформаций требует исследования механических свойств оптоволоконных линий на предмет предельных характеристик. Прочность волоконных линий должна с запасом превышать уровень напряжений, обеспечивающих измеряемые деформации.

Определение предельных механических характеристик и проведение механических испытаний оптоволоконных линий требует предварительной подготовки испытываемых образцов. В ходе подготовки образцов линии оптического волокна оснащались металлическими элементами, позволяющими закрепить образец в захват испытательной машины без повреждения волоконной линии. Расстояние между краями металлических элементов составляло (300 ± 2) мм. На металлических элементах, установленных на волоконной линии, закреплялись маркеры, перемещение которых соответствовало перемещениям на краях рабочей зоны образца. Перемещения маркеров регистрировались лазерными датчиками перемещения с точностью измерения 0,001 мм (рис. 5).

Испытания 20 образцов с нанесенными ВБР, по одной на каждом образце, проводились на разрывной машине Testometric FS100kN CT с установленной ячейкой измерения силы с предельной нагрузкой 100 Н и погрешностью измерений $\pm 0,5$ Н со скоростью 0,5 мм/мин, обеспечивающей скорость деформации 10^{-3} с^{-1}

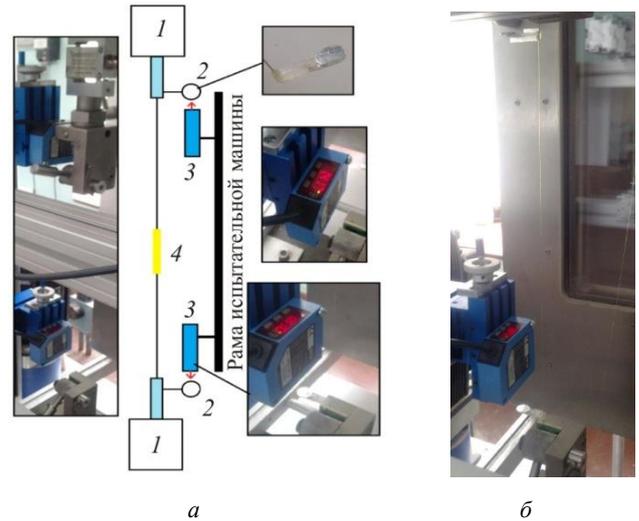


Рис. 5. Схема испытательной установки (а): 1 – захваты испытательной машины; 2 – маркеры границ испытательной базы; 3 – датчики перемещений; 4 – решетка Брэгга; образец, установленный в захваты испытательной машины (б)

Fig. 5. Scheme of the test facility (a): 1 is the test machine grips; 2 is the test base boundary markers, 3 are the displacement sensors; 4 is the Bragg grating; the specimen in the testing machine grips (b)

В таблице приведены итоговые результаты механических испытаний волоконно-оптических линий.

Результаты механических испытаний волоконно-оптических линий

Results of mechanical tests of the fiber-optic lines

Параметр	\bar{x}	S_{n-1}	CV, %
Напряжение разрушения σ_b , МПа	932,8	180,23	19,32
Усилие при разрушении F_p , Н	15,4	2,98	19,32
Относительное удлинение при разрушении δ , мм	5,226	0,959	18,355
Деформация при разрушении ϵ_b , %	1,73	0,32	18,59
Модуль упругости E , ГПа	54,7	5,1	9,4

Статистическая обработка данных осуществлялась по следующим формулам:

среднее значение

$$\bar{x} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}, \quad (3)$$

стандартное отклонение

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

коэффициент вариации

$$CV = \frac{100S_{n-1}}{\bar{x}}. \quad (5)$$

3. Результаты исследования особенностей фазового перехода в пористой среде и обсуждение

Измерительная система, схема которой приведена на рис. 1, является модульной и может быть реализована в различных конфигурациях. Испытания разработанной системы мониторинга температурно-деформационных характеристик фазового перехода в пористой среде проводились с использованием термопар, трех датчиков деформации на основе ВБР и трех температурных датчиков на основе ВБР. Расположение термопар и датчиков в данной работе представлено на рис. 6. Датчики ВБР располагались в объеме образца на расстоянии 2, 6 и 10 мм от торца образца, от которого распространялся фронт фазового перехода. Линии температурных и деформационных датчиков проходили на расстоянии 5 мм от оси цилиндра, параллельно оси. Точки входа и выхода линий волоконных датчиков располагались на диаметрах торцов образца.

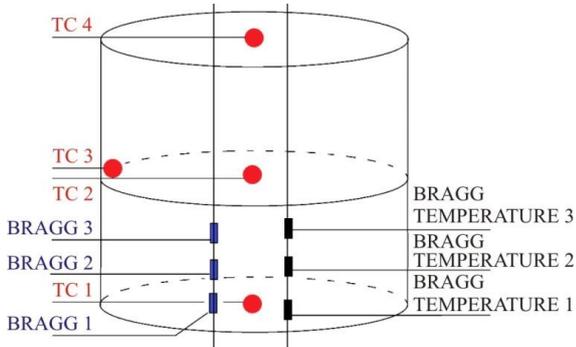


Рис. 6. Схема расположения датчиков в образце

Fig. 6. Arrangement of sensors in the sample

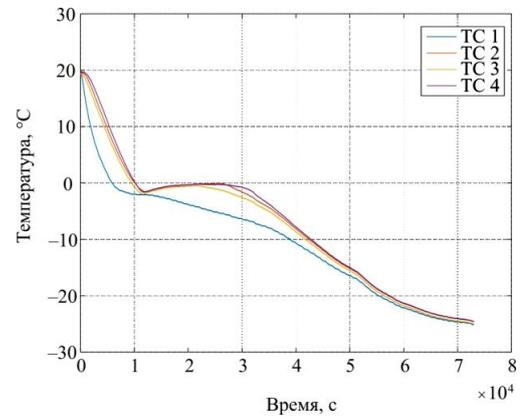
Все стороны образца, кроме нижней (в соответствии с рис. 4), изолированы от теплопотерь. Образец помещается в камеру с температурой $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, достаточной для полного замораживания влаги. Начальная температура образца $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Изменение температуры от времени, регистрируемое термопарами, представлено на рис. 7, а.

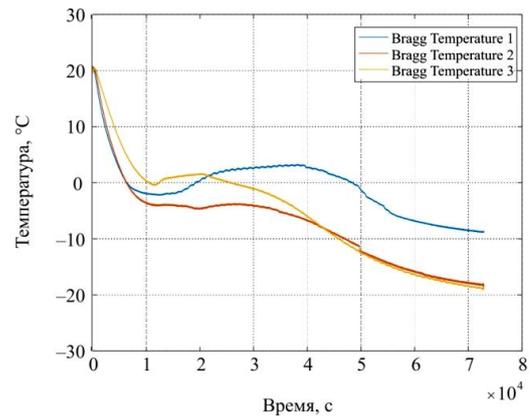
Из графика видно, что на термопаре TC 1 температура начинает уменьшаться сразу после начала испытания, через некоторое время начинает уменьшаться температура на термопарах TC 2 и TC 3. Температура на термопаре TC 4 также начинает изменяться практически одновременно с TC 2 и TC 3. Следует отметить, что показания термопар соответствуют случаю, когда фазовый переход начинается со всех сторон образца с задержкой относительно нетеплоизолированной торцевой поверхности. Это свидетельствует о том, что использованная теплоизоляция образца не обеспечивает необходимых условий для распространения фазового перехода вдоль оси образца.

Дальнейшее поведение показаний термопары TC 1 свидетельствует о малом влиянии фазового перехода,

потому как термопара закреплена на основании формы и не полностью погружена в грунт. Остальные термопары фиксируют особенности фазового перехода, о чем свидетельствует «плато» на графиках температур. Можно заметить, что на термопару TC 2 фазовый переход оказывает большее влияние, чем на термопару TC 3. Данные эффекты связаны с особенностью закрепления термопар на стенке формы для образца.



а



б

Рис. 7. Температура, регистрируемая термопарами, расположенными в образце (а); показания датчиков температуры на основе ВБР (б)

Fig. 7. Temperature recorded by thermocouples located in the sample (a); the results of temperature measurements based on FBG sensors (b)

На рис. 8 представлены результаты измерений деформаций, влияющих на показания расположенных в образце деформационных датчиков ВБР. Анализ данных, представленных на рис. 8, позволяет утверждать, что начальный участок уменьшения показаний датчиков связан с влиянием температуры. Исключение влияния температуры возможно методом температурной компенсации, описанным выше. Дальнейший рост показаний датчиков на фоне продолжающегося уменьшения температуры связан с развитием фазового перехода. Увеличение деформации говорит о сравнительно медленной кинетике фазового перехода. Одновременное начало деформации на всех датчиках говорит о сложном процессе

взаимодействия волокна и окружающего грунта и, по-видимому, о существенном проскальзывании между волокном и окружающими частицами грунта.

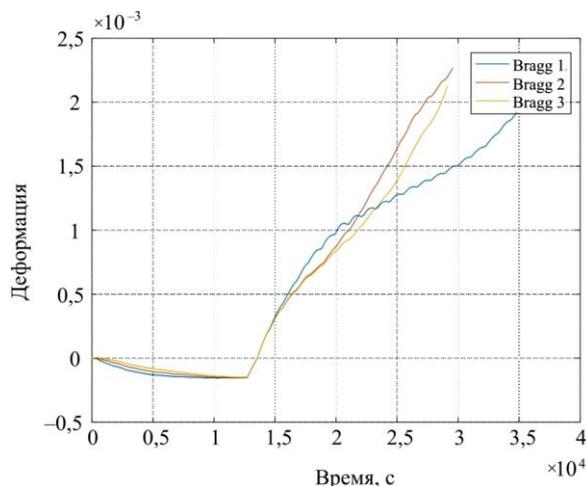


Рис. 8. Показания датчиков деформации на основе ВБР

Fig. 8. The readings of strain sensors based on FBG

Следует отметить, что остановка измерений деформации до достижения окончания фазового перехода вызвана выходом максимума спектра отраженной волны датчиков за допустимые программные пределы. Дальнейший анализ результатов показал, что расширение программных пределов (± 3 нм) до значения физического предела для установленных датчиков (± 5 нм) также недостаточно для измерения деформаций, реализуемых в процессе фазового перехода.

На рис. 7, б представлены показания датчиков температуры на основе ВБР. На графике явно выражено резкое уменьшение температуры после начала испытания; заметно, что датчик № 3 позже других начинает регистрировать изменение температуры. Синхронное поведение датчиков № 1 и 2 говорит о высокой теплопроводности системы (хороший температурный контакт по оптоволокну) или связано с краевым эффектом. Дальнейшее поведение графиков включает в себя одновременно температурные и деформационные эффекты. С этим связан рост измеренной температуры после начала фазового перехода, смещение температуры начала перехода и осцилляции. Особенно ярко совместное влияние деформирования и охлаждения проявляется на границе области, где показания деформационного и температурного датчика синхронно осциллируют. После завершения фазового перехода температурные датчики ВБР регистрируют изменение температуры по глубине образца, изменения деформационного воздействия в дальнейшем не происходит.

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что предложенная конструкция деформационных и температурных датчиков на основе ВБР позволяет исследовать распределение температуры и деформации до и после фронта фазового перехода. Сложные деформационные процессы, связанные с замедленной кинетикой

фазового перехода и дополнительной деформацией, вызванной дефектом массы, приводят к сложным процессам сдвига максимума спектра отраженного сигнала и не позволяют напрямую интерпретировать его как изменение температуры в области волоконно-оптического датчика.

Сравнение графиков, представленных на рис. 7, а и б, позволяет утверждать, что показания температурных датчиков ВБР не соответствуют реальным значениям температуры. Температура в объеме морозильной камеры соответствует конечным, установившимся, показаниям термопар, что свидетельствует об установлении теплового баланса между образцом и окружающей средой. Показания температурных датчиков ВБР также имеют постоянные значения в конце испытания, однако не соответствуют температуре в объеме морозильной камеры. Расхождение показаний связано с влиянием деформации, вызванной фазовым переходом, на температурные датчики ВБР.

Деформационные датчики достаточно надежно фиксируют изменение деформации и требуют сравнительно простой температурной компенсации в области фазового перехода.

Заключение

На основании итогов проведенной работы можно утверждать, что разработанная система мониторинга деформации и температуры в пористой среде на основе ВБР-датчиков позволяет оценить локальную температуру образца на различных стадиях заморозки до и после фронта фазового перехода, а также измерить кинетику деформаций в процессе фазового перехода. В результате проведенных экспериментов показано, что фазовый переход вызывает существенно возрастающую деформацию образца в осевом направлении. При этом характер деформации меняется в зависимости от расстояния до поверхности образца.

Проведенные эксперименты показали основные проблемы ВБР-датчиков, связанные с совместным влиянием температуры и деформации на сдвиг максимума спектра отраженной волны брэгговской решетки. Особенно чувствительными оказались температурные датчики, показания которых можно считать адекватными только до фазового перехода.

Разработанная система позволяет измерить распределение температуры и деформации по глубине образца и ставит ряд интересных задач по разработке методов температурной компенсации датчиков в условиях фазового перехода во влагонасыщенной пористой среде, сопровождающегося увеличением объема влаги. Потенциально созданная система позволяет экспериментально показать, что завершение фазового перехода в пористой среде происходит при температуре существенно ниже нуля и требует конечных времен. Точные значения температуры завершения фазового перехода

и его характерное время могут быть измерены после разработки, соответствующей процедуры температурно-деформационной калибровки.

Улучшения системы дополнительно требуют изменения условий замораживания с использованием ранее разработанного контактного генератора – измерителя потока тепла на основе элементов Пельтье [30], анализа условий взаимодействия датчиков и окружающего грунта, а также конструкционных изменений температурных датчиков. Одним из возможных решений является использование кварцевых оболочек, обеспечиваю-

щих достаточную теплопроводность и устойчивость к возникающим в процессе заморозки деформациям.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 17-11-01204).

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant Nr. 17-11-01204).

Библиографический список

1. Degrieck J., Wim D.W., Patricia V. Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels // *NDT&E Int.* – 2001. – Vol. 34. – P. 289–296.
2. Influence of lamination process on optical fiber sensors embedded in composite material / P. Lesiak, M. Szeląg, D. Budaszewski, R. Plaga, K. Mileńko, G. Rajan, Y. Semenova, G. Farrell, A. Boczkowska, A. Domański [et al.] // *Measurement.* – 2012. – Vol. 45. – P. 2275–2280. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.03.010
3. Marques C.A.F., Webb D.J., Andre P. Polymer optical fiber sensors in human life safety // *Opt. Fiber Technol.* – 2017. – Vol. 36. – P. 144–154.
4. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques / C. Hong, Y. Zhang, M. Zhang, L. Leung, L. Liu // *Sensors and Actuators A.* – 2016. – Vol. 244. – P. 184–197.
5. Kousiatza C., Karalekas D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process // *Materials and Design.* – 2016. – Vol. 97. – P. 400–406.
6. Raongjant W., Jing M. Field testing of stiffened deep cement mixing piles under lateral cyclic loading // *Earthquake Eng. Eng.* – 2013. – Vol. 12. – P. 261–265.
7. Rao Y.J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors // *Opt. Laser. Eng.* – 1999. – Vol. 31. – P. 297–324.
8. Field validation of fibre Bragg grating sensors for measuring strain on driven steel piles / P. Doherty, D. Igoe, G. Murphy, K. Gavin, J. Preston, C. McAVOY [et al.] // *Geotech. Lett.* – 2015. – P. 74–79.
9. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes / I.A. Panteleev, A.A. Kostina, O.A. Plekhov, L.Yu. Levin // *Sciences in Cold and Arid Regions.* – 2017. – Vol. 9(4). – P. 363–377.
10. Soil nail monitoring using Fiber Bragg Grating sensors during pullout tests / H.H. Zhu, J.H. Yin, W. Jin, W.H. Zhou // *The Joint 60th Canadian Geotechnical and 8th IAH-CNC Conferences Ottawa, 2007.* – P. 821–828.
11. Hong C.Y., Yin J.N., Zhou W.H. Study on cement grout quality of model soil nails measured using long gage FBG Sensing Technology // *The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference, 2010.* – P. 237–240.
12. Comparative study on the elongation measurement of a soil nail using optical lower coherence interferometry method and FBG method / C.Y. Hong, J.H. Yin, W. Jin, C. Wang, W.H. Zhou, H.H. Zhu // *Adv. Struct. Eng.* – 2010. – Vol. 13. – P. 309–319.
13. Левин Л.Ю., Семин М.А., Плехов О.А. Сравнительный анализ существующих методов расчета толщины ледопо-

родного ограждения строящихся шахтных столов. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура.* – 2018. – № 4.

14. Ершов Э.В. Общая геокриология: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.

15. Шабаров А.Б. Физико-математическая модель и метод расчета течения газоконденсатной смеси в пласте // *Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика.* – 2014. – № 7. – С. 7–18.

16. Коновалов А.А. Связь температур переохлаждения и кристаллизации влажного грунта с его прочностью в мерзлом состоянии // *Инженерно-физический журнал.* – 2015. – Т. 88, № 5. – С. 1043–1049.

17. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Тимофеевский Л.С. Горная теплофизика (Регулирование теплового режима шахт и рудников). – Л.: Изд-во ЛГИ, 1976. – 96 с.

18. Bouyoucos G.J. Degree of temperature to which soils can be cooled without freezing // *Journal of Agricultural Research.* – 1920. – Vol. 20. – P. 267–269.

19. Kemper W.D. Water and ion movement in thin films as influenced by the electrostatic charge and diffuse layer of cations associated with clay mineral surfaces // *Soil Science Society of America Proceedings.* – 1960. – Vol. 24. – P. 10–16.

20. Dirksen C., Miller R.D. Closed-system freezing of unsaturated soil // *Soil Science Society of America Proceedings.* – 1996. – Vol. 30. – P. 168–173.

21. Furukawa Y., Shimada W. 3-dimensional pattern-formation during growth of ice dendrites, its relation to universal law of dendritic growth // *J. Crystal Growth.* – 1993. – Vol. 128. – P. 234–249.

22. Hoekstra P. Moisture movement in soil under temperature gradients with the cold side temperature below freezing // *Water Resource Research.* – 1966. – Vol. 2. – P. 241–250.

23. Hu H., Yang S., Lei Z. A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing // *J. Hydraul. Eng.* – 1992. – Vol. 7. – P. 1–8 (in Chinese with English abstract).

24. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива в процессе искусственного замораживания / М.С. Желнин, О.А. Плехов, М.А. Семин [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2017. – № 4. – С. 56–75.

25. Bronfenbrener L. Modelling Heat and Mass Transfer in Freezing Porous Media. – N.Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2012.

26. Исследование особенностей неравновесного фазового перехода в флюидонасыщенном грунте / А.Е. Прохоров, М.С. Желнин, А.А. Костина, О.А. Плехов // *Вестник Пермского университета. Физика.* – 2018. – № 4 (42). – С. 31–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-4-31-37

27. Шардаков И.Н., Кошелева Н.А., Цветков Р.В. Экспериментальный и теоретический варианты термокомпенсации волоконно-оптических датчиков деформации // Прикладная фотоника. – 2017. – № 4. – С. 325–336.

28. Determination of Thermo-Optic Coefficient in Liquids with Fiber Bragg Grating Refractometer / R. Kamikawachi, I. Abe, A. Paterno, H. Kalinowski, M. Muller [et al.] // Optics Communications. – 2008. – Vol. 281. – No. 4. – P. 621–625.

References

1. Degrieck J., Wim D.W., Patricia V. Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels // NDT&E Int. – 2001 – Vol. 34 – pp. 289–296.

2. Lesiak P., Szelaż M., Budaszewski D., Plaga R., Mileńko K., Rajan G., Semenova Y., Farrell G., Boczkowska A., Domański A., et al. Influence of lamination process on optical fiber sensors embedded in composite material. // Measurement – 2012 – Vol. 45 – pp. 2275–2280. doi: 10.1016/j.measurement.2012.03.010.

3. Marques, C.A.F.; Webb, D.J.; Andre, P. Polymer optical fiber sensors in human life safety // Opt. Fiber Technol. – 2017 – Vol. 36 – pp. 144–154.

4. Hong C., Zhang Y., Zhang M., Leung L., Liu L. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques // Sensors and Actuators A – 2016 – Vol. 244 – pp. 184–197

5. Kousiatz C., Karalekas D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process. // Materials and Design – 2016 – Vol. 97 – pp. 400–406.

6. W. Raongjant, M. Jing, Field testing of stiffened deep cement mixing piles under lateral cyclic loading // Earthquake Eng. Eng. – 2013 – Vol. 12 – pp. 261–265.

7. Y.J. Rao, Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors // Opt. Laser. Eng. – 1999 – Vol. 31 – pp. 297–324.

8. P. Doherty, D. Igoe, G. Murphy, K. Gavin, J. Preston, C. McAVOY, et al., Field validation of fibre Bragg grating sensors for measuring strain on driven steel piles // Géotech. Lett. – 2015 – pp. 74–79

9. Panteleev I.A.; Kostina A.A.; Plekhov O.A., Levin L.Yu. Numerical simulation of artificial ground freezing in a fluid-saturated rock mass with account for filtration and mechanical processes // Sciences in cold and arid regions. – 2017. – Vol. 9(4) – pp. 363–377.

10. H.H. Zhu, J.H. Yin, W. Jin, W.H. Zhou, Soil nail monitoring using Fiber Bragg Grating sensors during pullout tests // The Joint 60th Canadian Geotechnical and 8th IAH-CNC Conferences Ottawa – 2007 – pp. 821–828.

11. C.Y. Hong, J.N., Yin, W.H. Zhou, Study on cement grout quality of model soil nails measured using long gage FBG Sensing Technology // The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference – 2010 – pp 237–240.

12. C.Y. Hong, J.H. Yin, W. Jin, C. Wang, W.H. Zhou, H.H. Zhu, Comparative study on the elongation measurement of a soil nail using optical lower coherence interferometry method and FBG method // Adv. Struct. Eng. 2010 – Vol. 13 – pp. 309–319.

13. Levin L. Yu., Semin, M., Plekhov, O. A comparative analysis of the existing methods of calculating the thickness of the ice-rock walls of the mineshafts. Vestnik of PSTU Construction and architecture. – 2018 – № 4. (accepted for publication)

14. Ershov E.V. Obschchaya-geokriologiya-uchebnik. M., izd-vo MSU, 2002 – 682 c

15. Shabarov A.B. Physical-mathematical model and flow method of gas-condensate mixture in reservoir // Bulletin of Tyumen State Oil and Gas University. Physical-mathematical Science. Computer Science. 2014 – № 7. – C. 7–18.

29. Kang D., Kim H.-Y., Kim D.-H. Enhancing Thermal Reliability of Fiber-Optic Sensors for Bio-Inspired Applications at Ultra-High Temperatures // Smart Materials and Structures. – 2014. – Vol. 23. – No. 7.

30. The study of energy balance in metals under deformation and failure process / A. Iziunova, A. Vshivkov, A. Prokhorov, A. Kostina, O. Plekhov // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2016. – Vol. 13. – No. 2. – P. 242–256.

16. Konovalov A.A. Svyaz temperatur pereohlazhdeniya i kristallizacii vlazhnogo grunta s ego prochnostyu v merzлом sostoyanii inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2015 – T. 88. № 5 – C. 1043–1049.

17. Dyadkin Yu.D. Shuvalov Yu.V. Timofeevskij L.S. Gornaya teplofizika (Regulirovanie teplovogo rezhima shaht i rudnikov) I izd-vo Igi, 1976. – 96 c.

18. Bouyoucos, G.J. Degree of temperature to which soils can becooled without freezing // Journal of Agricultural Research – 1920 – Vol. 20 – pp. 267–269.

19. Kemper, W.D. 1960. Water and ion movement in thin films as influenced by the electrostatic charge and diffuse layer of cations associated with clay mineral surfaces // Soil Science Society of America Proceedings – 1960 – Vol. 24 – pp. 10–16.

20. Dirksen, C., and Miller, R.D. Closed-system freezing of unsaturated soil // Soil Science Society of America Proceedings – 1996 – Vol. 30 – pp. 168–173.

21. Furukawa Y., Shimada W. 1993. 3-dimensional pattern-formation during growth of ice dendrites, its relation to universal law of dendritic growth. // J. Crystal Growth – 1993 – Vol. 128 – pp. 234–249.

22. Hoekstra P. Moisture movement in soil under temperature gradients with the cold side temperature below freezing // Water Resource Research – 1966 – Vol. 2 – pp. 241–250.

23. Hu, H., Yang, S., Lei, Z., 1992. A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing. J. Hydraul. Eng. 7, 1–8 (in Chinese with English abstract).

24. Zhelnin M.S., Plekhov O.A., Semin M.A. et al. Numerical solution for an inverse problem about determination of volumetric heat capacity of rock mass during artificial freezing. PNRPU Mechanics Bulletin, 2017, no. 4, pp. 56–75.

25. Bronfenbrener, L., Modelling Heat and Mass Transfer in Freezing Porous Media. // Nova Science Publishers, Inc., N.Y. 2012.

26. Prokhorov A.E., Zhelnin M.S., Kostina A.A., Plekhov O.A. Investigation of non-equilibrium phase transition in freezing porous media. Bulletin of Perm University. Physics, 2018, no. 4 (42), pp. 31–37. doi: 10.17072/1994-3598-2018-4-31-37

27. I.N. Shardakov, N.A. Kosheleva, R.V. Tsvetkov Experimental and theoretical variants of thermal compensation of fiber-optical strain sensors // Applied photonics – 2017 – vol.4 – pp. 325–336 ISSN 2411-4375

28. Kamikawachi, R., Abe, I., Paterno, A., Kalinowski, H., Muller, M., et al., Determination of Thermo-Optic Coefficient in Liquids with Fiber Bragg Grating Refractometer // Optics Communications, – 2008 – Vol. 281, No. 4 – pp. 621–625.

29. Kang, D., Kim, H.-Y., and Kim, D.-H., Enhancing Thermal Reliability of Fiber-Optic Sensors for Bio-Inspired Applications at Ultra-High Temperatures // Smart Materials and Structures – 2014 – Vol. 23, No. 7

30. Iziunova A., Vshivkov A., Prokhorov A., Kostina A. and Plekhov O. 2016 The study of energy balance in metals under deformation and failure process // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2016 – Vol. 13 No. 2 – pp. 242–256.