

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 551.435.626

Метод оценки напряженного состояния материалов по данным инфракрасного излучения

В.В. Середин^а, А.С. Хрулев^б

^аПермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: seredin@nedra.perm.ru

^бООО НИПППД «Недра», 614064, Пермь, ул. Льва Шатрова, 13а
E-mail: nedra@nedra.perm.ru

(Статья поступила в редакцию 4 апреля 2015 г.)

Для решения ряда геологических и инженерных задач необходимо знание напряженного состояния материала элементов сооружения. Для оценки напряженного состояния материалов применяются неразрушающие методы контроля. В основу их положены такие критерии, как звуковое давление, температура, характеристики распространения ультразвука и др., а также методы, которые позволяют оценить напряженное состояние материала после его разрушения. Разработка методов второй группы обусловлена тем, что в практике достаточно часто встречаются случаи, когда проектные решения (расчетные модели) не всегда обеспечивают устойчивость инженерных объектов. Поэтому необходимо иметь информацию о реальных нагрузках (напряжениях), при которых произошло разрушение элементов сооружения. Особенно важны эти методы в качестве инструмента для экспертов, выявляющих причины аварий. Эта информация позволит провести корректировку расчетных моделей, тем самым повысив надежную эксплуатацию сооружений. Целью данных исследований является разработка метода оценки напряженного состояния материалов по данным инфракрасного излучения. Экспериментальные исследования показали, что между температурой на поверхности материала и нормальными напряжениями, действующими в зоне разрушения, существует взаимосвязь. С увеличением нормальных напряжений в зоне трещины разрушения температура на поверхности материала возрастает. На основании выявленной закономерности разработан способ определения напряженного состояния материалов по данным инфракрасного излучения.

Ключевые слова: *напряженное состояние материала, инфракрасное излучение, магистральная трещина разрушения, одноосное сжатие, устойчивость инженерных сооружений.*

DOI: 10.17072/psu.geol.28.28

При решении ряда геологических и инженерных задач необходимо знание напряженного состояния элементов сооружения. Для оценки напряженного состояния материалов применяются методы, которые можно объединить в две группы. В первую группу входят методы, по которым можно оценить напряженное состояние материала до его разрушения – это неразрушающие методы контроля. В основу их положены такие критерии, как звуковое давление, температура, ультразвук и др. [1, 2, 6].

Ко второй группе относятся методы, по которым оценивается напряженное состояние материала после его разрушения [9]. Разработка методов второй группы обусловлена тем, что в практике достаточно часто встречаются случаи, когда проектные решения (расчетные модели) не всегда обеспечивают устойчивость инженерных объектов. Это приводит к аварийным ситуациям, поэтому необходима информация о реальных нагрузках (напряжениях), при которых произошло разрушение элементов сооружения. Особенно важны эти методы в качестве инструмента для экспертов, выявляющих причины аварий. Кроме того, информация позволит провести корректировку расчетных моделей, тем самым повысив надежную эксплуатацию сооружений.

Целью данных исследований является разработка метода оценки напряженного состояния материалов по данным инфракрасного излучения.

Выбор и обоснование критериев оценки напряженного состояния материалов

В работе [10] исследованы взаимосвязи между напряженным состоянием материалов и величиной шероховатости (Rz) поверхности магистральной трещины разрушения. Выявлено, что при одноосном растяжении Rz принимает меньшие значения, чем при одноосном сжатии. В условиях сжатия установлено закономерное уменьшение Rz с увеличением максимальных нормальных напряжений (σ_n), действующ-

щих в зоне разрушения материалов. Поэтому в качестве критерия оценки напряженного состояния материалов можно использовать показатель Rz .

При нагружении материалов до разрушения в зоне магистральной трещины наблюдается увеличение температуры (Δt) исследуемых материалов. При этом в условиях одноосного растяжения Δt принимает меньшие значения, чем при одноосном сжатии [7].

В зоне сжимающих напряжений на поверхности трещины разрушения исследуемый материал изменяет первоначальный состав и структуру. Так, в каменной соли, гипсе и пенобетоне первоначальная структура преобразуется в полосчатую, ориентированную в сторону сдвига структуру. В зоне разрушения обнаружен песок трения преимущественно пылеватой фракции [7].

Таким образом, для оценки напряженного состояния материалов теоретически можно использовать следующие критерии:

- величину шероховатости (Rz) поверхности магистральной трещины разрушения;
- температуру (Δt) материала в ее зоне;
- изменение первоначальной структуры материалов магистральной трещины разрушения;
- изменение минерального состава ее материнской породы.

В данной работе нами был использован показатель Δt .

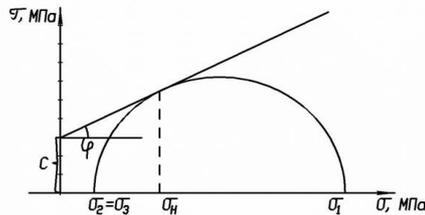
Метод оценки напряженного состояния материалов

Метод включает в себя следующие операции.

1. Из материала исследуемой конструкции сооружения изготавливаются образцы, которые испытываются в условиях одноосного сжатия и растяжения, а также в объемном напряженном состоянии.

2. По данным испытаний строится паспорт прочности грунта. По нему определяют максимальные нормальные напряжения (σ_n), действующие в зоне разрушения материалов для каждого вида напряженно-

го состояния (рисунок). Под видом напряженного состояния материала понимаем его работу в условиях одноосного сжатия и растяжения, а также в объемном напряженном состоянии.



Паспорт прочности грунтов: максимальные нормальные напряжения (σ_n), угол внутреннего трения пород (φ), сцепление (c), главные нормальные напряжения (σ_1 и σ_2)

3. До и после испытаний образцов определяется среднее значение температуры (Δt_{cp}) в зоне магистральной трещины разрушения для каждого вида напряженного состояния грунта – одноосных сжатия и растяжения, объемного напряженного состояния [7].

4. Затем строится номограмма изменения температуры (Δt_{cp}) на поверхности магистральной трещины разрушения материалов в зависимости от σ_n .

5. С поверхности исследуемого элемента конструкции сооружения при помощи тепловизора снимается термограмма, после обработки которой определяется средняя температура (Δt_{cp}), при которой произошло разрушение материала.

6. По величине Δt_{cp} , используя полученную номограмму (п. 4), вычисляют напряжения (σ_n).

7. Затем по σ_n , используя паспорт прочности материала (рисунок), определяют напряженное состояние материала (σ_1 и σ_2), при котором произошло разрушение элемента конструкции исследуемого сооружения, путем построения круга Мора.

8. По данным напряженного состояния материала находят значения прочности – сцепление (C) и угол внутреннего трения (φ), при котором произошло разрушение конструкции сооружения (рисунок).

Пример реализации метода

Для оптимизации конструктивных параметров инженерных сооружений, в том числе для определения ширины и высоты межэтажных стоек, необходимы информация о виде их напряженного состояния, а также предельные прочностные характеристики бетона, изготовленного из цемента М-400, при котором стойки находятся в устойчивом состоянии.

Предложенный метод реализуется следующим образом:

1. Изготавливаются образцы из бетона М-400 по методике, изложенной в работе [7]. Образцы материалов испытываются на одноосное σ_p -растяжение, σ_c -сжатие и в условиях объемного напряженного состояния [7]. Бетон исследуется при боковых давлениях ($\sigma_2 = \sigma_3 = 3,2$ МПа) в стабилометре.

2. По результатам исследований строится паспорт прочности.

3. После испытаний образцов (их разрушения) определяется средняя температура (Δt_{cp}), при которой произошло разрушение материала для каждого вида напряженного состояния грунта – одноосных сжатия и растяжения, объемного напряженного состояния. Результаты измерений (Δt_{cp}) приведены в таблице.

4. Определение σ_n производилось по зависимости:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

$$\alpha = 45 - \varphi / 2, \quad (2)$$

здесь φ – угол внутреннего трения, град.

Результаты исследований (σ_n) приведены в таблице.

5. Затем строится номограмма изменения Δt_{cp} в зависимости от σ_n .

6. Далее при помощи тепловизора с поверхности исследуемого элемента конструкции сооружения снимается термограмма, после обработки которой вычислялась средняя температура $\Delta t_{cp} = 0,6^\circ\text{C}$, при которой произошло разрушение материала.

7. По величине $\Delta t_{cp} = 0,6^\circ\text{C}$, используя полученную номограмму, определяют зна-

чения максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения материалов $\sigma_n=5$ МПа.

8. Затем по $\sigma_n=5$ МПа, используя паспорт прочности каменной соли, опре-

деляют напряженное состояние материала $\sigma_1=22$ МПа и $\sigma_2=0$, при котором произошло разрушение элемента сооружения.

Результаты измерений при испытании образцов

Материал	Объемное напряженное состояние			Одноосное сжатие			Одноосное растяжение		
	σ_1 , МПа	σ_n , МПа	$\Delta t_{ср}$, град	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_n , МПа	$\Delta t_{ср}$, град	σ_p , МПа	σ_n , МПа	$\Delta t_{ср}$, град
Цемент М400	30,3	14,0	1,4	25,6	8,0	0,8	0,21	0,07	0,5

Заключение

Разработан способ определения напряженного состояния материалов, основанный на взаимосвязи между температурой на поверхности разрушения $\Delta t_{ср}$ и напряжениями σ_n , действующими в зоне разрушения.

Библиографический список

1. Блохин Д.И. Методика оценки «быстропротекающих» изменений напряженного состояния грунтов и горных пород по данным инфракрасной (ИК-) радиометрии: автореф. дис. ... к.т.н. М., 2005. 12 с.
2. Вознесенский А.С., Устинов К.Б., Шкуратник В.Л. Теоретическая модель акустической эмиссии при механическом нагружении горных пород в области максимального уплотнения // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47, № 4. С. 145–152.
3. Konoplev A.V., Krasilnikov P.A. A Technique for Mapping territorial combinations of Natural resources and their comprehensive assessment by a Gis Tecynology // Geography and Natural Resources. 2012. Т. 33, № 1. С. 83–86.
4. Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф. Исследование распределения углеводородов по разрезу грунтового массива // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–14. С. 3100–3104.
5. Кузнецов Ф.М., Козлов А.П., Середин В.В., Пименова Е.В. Рекультивация нефтезагрязненных почв: учебное пособие. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2003. 198 с.
6. Опарин В.Н., Яковицкая Г.Е., Вострецов А.Г., Серяков В.Н., Кривецкий А.В. О коэффициенте механоэлектромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 3–20.
7. Середин В.В. Исследование температуры пород в зоне трещины разрушения // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–12. С. 2713–2717.
8. Середин В.В. Способ построения паспортов прочности горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1985. № 4. С. 110–111.
9. Середин В.В., Лаптев Б.В. Способ определения напряженного состояния материала. Авторское свидетельство 1173244 СССР. Бюл. № 30. 3 с.
10. Seredin V.V., Kopylov I.S., Khrulev A.S., Leibovich L.O., Pushkareva M.V. Evolution of Fracture surface morphology in Rocks/ Journal of Mining Science. 2013. Т. 49, № 3. С. 409–412.
11. Чиков Б.М. Проблемы геологической интерпретации сейсмоочаговых систем земной коры (геомеханика и тектонофизический анализ) // Геодинамика и тектонофизика. 2010. № 3. С. 231–248.

Method of the Material Stress Assessment Using the Infrared Thermography

V.V. Seredin^a, A.S. Khrulev^b

^a Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia

E-mail: seredin@nedra.perm.ru

^b LLC «Nedra», 13a Lva Shatrova Str., Perm 614064, Russia

E-mail: nedra@nedra.perm.ru

The solution of a number of geological and engineering problems require knowledge of the stress state of the structural member material. Non-destructive testing methods are used to evaluate the stress state of materials. They are based on such criteria as sound pressure, temperature, ultrasound wave's characteristics etc., as well as methods evaluating the stress state of the material after destruction. Development of methods of this group is caused by insufficient reliability of theoretical modelling not providing in some case stability of engineering facilities in practice. To avoid the emergencies, it is important to obtain the information on the actual load (stress) at which the structure destruction occurred. These methods are especially important as a tool for experts identifying the cause of the accidents at engineering facilities. Additionally, this information will provide a correction of calculation models improving the safe exploitation of facilities. The aim of this study was to develop a method of materials stress state assessment using an infrared thermography data. Experimental studies showed that there exists a relationship between the temperature on the surface of material displacement and the normal stress affecting the area of failure. The temperature on the surface of material increases with an increase in normal stress in a fracture area. On a basis of the revealed relationship, a method of determination of the material stress state using the infrared thermography data was worked out.

Keywords: *stress state of material, infrared thermography, main crack, uniaxial compression, stability of engineering structures.*

References

1. *Blokhin D.I.* 2005. Metodika otsenki «bystroprotekayuschikh» izmeneniy napryazhennogo sostoyaniya gruntov i gornykh porod po dannym infrakrasnoy (IR-) radiometrii [Methodology of assessment of fast changes of soil and rock stress conditions using infrared thermography data]. Avtoreferat of Diss. Kand. Sci., Moskva, p. 12. (in Russian)
2. *Voznesenskiy A.S., Ustinov K.B., Shkuratnik V.L.* 2006. Teoreticheskaya model akusticheskoy emissii pri mekhanicheskom nagruzhении gornykh porod v oblasti maksimalnogo uplotneniya [The theoretical model of acoustic emission under the mechanical loading of rocks in the area of maximum compaction]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 47(4):145-152. (in Russian)
3. *Konoplev A.V., Krasilnikov P.A.* 2012. A Technique for mapping territorial combinations of Natural resources and their comprehensive assessment by a Gis Tecynology. Geography and Natural Resources, 33(1):83–86. (in Russian)
4. *Krasilnikov P.A., Seredin V.V., Leonovich M.F.* 2015. Issledovanie raspredeleniya uglevodorodov po razrezu gruntovogo massiva [Investigation of the distribution of hydrocarbons into the cross-section of ground mass]. Basic research, 2-14, pp. 3100-3104. (in Russian)
5. *Kuznetsov F.M., Kozlov A.P., Seredin V.V., Pimenova E.V.* 2003. Rekultivatsiya neftezagryaznennykh pochv [Remediation of oil-contaminated soils]. Textbook. Publishing house of Perm State Technical University, Perm, p. 198. (in Russian)

6. *Oparin V.N., Yakovitskaya G.E., Vostretsov A.G., Seryakov V.N., Krivetsky A.V.* 2013. O koeffitsiente mekhano-elektromagnitnykh preobrazovaniy pri razrushenii obraztsov gornykh porod [On the coefficient of mechanical-electromagnetic alteration during the destruction of rock samples]. Physical and technical problems of mining, 3:3-20. (in Russian)
7. *Seredin V.V.* 2014. Issledovanie temperatury porod v zone treshchiny razrusheniya [Study of the rocks temperature in the area of the brittle fracture]. Basic Researches, 9-12, pp. 2713-2717. (in Russian)
8. *Seredin V.V.* 1985. Sposob postroeniya passportov prochnosti gornykh porod [The method of obtaining the certificate of rock strength]. Physical and technical problems of mining, 4:110-111. (in Russian)
9. *Seredin V.V., Laptev B.V.* Sposob opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya materiala [Method of determination of the stress state of the material]. Invention certificate 1173244 USSR, Bull. No. 30, p. 3.
10. *Seredin V.V., Kopylov I.S., Khrulev A.S., Leibovich L.O., Pushkareva M.V.* 2013. Evolution of fracture surface morphology in rocks. Journal of Mining Science, 49(3):409–412.
11. *Chikov B.M.* 2010. Problemy geologicheskoy interpretatsii seysmoochagovykh sistem zemnoy kory (geomekhanika i tektonofizicheskiy analiz) [Problems of geological interpretation of seismic focal systems of the Earth crust (geomechanics and tectonophysical analysis)] Geodynamics and Tectonophysics, 3:231-248. (in Russian)