

УДК 534.6:624.139.2/3

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ИХ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННУЮ АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ

Проведены экспериментальные исследования термостимулированной акустической эмиссии образцов песчано-глинистых грунтов, подвергаемых механическому нагружению. Установлены особенности акустической эмиссии при замораживании и оттаивании грунтов в зависимости от относительного содержания в них глинистых и песчаных частиц, а также величины действующей нагрузки. Показана возможность выделения по параметрам термостимулированной акустической эмиссии различных стадий напряженно-деформированного состояния грунтов. Разработан численный термоакустоэмиссионный критерий, позволяющий оценивать скорость разрушения структурных связей в мерзлых грунтах при их растеплении и изменении напряженного состояния.

### НОВИКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Кандидат технических наук, доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ "МИСиС" (Москва, Россия).

### ШКУРАТНИК ВЛАДИМИР ЛАЗАРЕВИЧ

Доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ "МИСиС" (Москва, Россия).

### ОШКИН РОМАН ОЛЕГОВИЧ

Аспирант кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ "МИСиС" (Москва, Россия).

### ЗАЙЦЕВ МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

Студент III курса, кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ "МИСиС" (Москва, Россия).

### Основные направления деятельности:

- геомеханика, геофизика, геоакустика, неразрушающий контроль, геокриология, механические свойства и разрушение геоматериалов и горных массивов. Автор около 50 опубликованных работ.

- геомеханика, геофизика, геоакустика, неразрушающий контроль, геокриология, механические свойства и разрушение геоматериалов и горных массивов. Автор 397 опубликованных работ.

- геомеханика, геофизика, геоакустика, геокриология, механические свойства и разрушение геоматериалов и горных массивов. Автор 10 опубликованных работ.

- геофизика, геоакустика, неразрушающий контроль, механические свойства и разрушение геоматериалов и горных массивов.

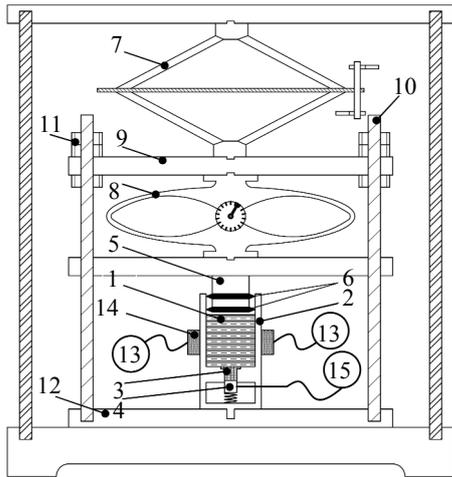
## Введение

Грунты, залегающие в основании зданий и сооружений, могут испытывать механические и температурные воздействия, первые из которых носят, как правило, квазистатический характер, а вторые – нестационарный. Особенно это характерно для северных регионов, где грунтовые основания периодически подвергаются природному замораживанию и оттаиванию, а также для подземного строительства с использованием технологии искусственного замораживания массива [1, 2].

Влияние указанных внешних воздействий сопровождается процессами дезинтеграции или консолидации грунтов. Оценка этих процессов, необходимая для прогноза несущей способности и устойчивости оснований и фундаментов, осуществляется в настоящее время на основе прямых или геофизических измерений [3...6]. Такие измерения характеризуются высокой трудоемкостью и сложностью интерпретации их результатов. Поэтому совершенствование традиционных и создание новых методов изучения состояния грунтов в условиях их механического и температурного нагружения остается актуальной задачей.

Метод акустической эмиссии (АЭ) зарекомендовал себя как эффективный инструмент изучения структурных изменений, роста поврежденности и потери прочности геоматериалов [7]. Образцы подвергаются либо механическому, либо термическому нагружению, порождающему внутренние деформации и напряжения (как следствие, возникают и увеличиваются дефекты), а значит и генерацию сигналов АЭ [8...10].

Учитывая специфику рассматриваемой задачи, для ее решения целесообразно использовать частный случай АЭ – метод термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), при котором акустоэмиссионный отклик, возбуждающийся в объекте контроля при термическом нагружении, рассматривается в качестве основного носителя информации о процессах термической дезинтеграции геосреды, находящейся в условиях напряженно-деформированного состояния. Реализация такого подхода к скальным горным породам показала, что возникающая в них ТАЭ



**Рис. 1.** Структурная схема лабораторной установки для термоакустоэмиссионных испытаний образцов мерзлых грунтов, находящихся под действием механической нагрузки

зависит не только от структурных особенностей, упругих, прочностных и теплофизических свойств, а также режимов температурного воздействия, но и от испытываемых ими квазистатических напряжений [11...15]. Более того, по параметрам ТАЭ представляется возможным оценить эти напряжения и определить на какой стадии деформирования находится горная порода.

До настоящего времени исследования ТАЭ в песчано-глинистых грунтах носили единственный характер. В [16] было показано, что замораживание и оттаивание грунтов сопровождается изменениями ТАЭ, связанными со степенью их водонасыщения. Настоящая работа посвящена исследованиям параметров ТАЭ песчано-глинистых грунтов в функции от испытываемых ими механических нагрузок, которые ранее не предпринимались.

#### Характеристика объектов, аппаратного и методического обеспечения термоакустоэмиссионных измерений

Исследовались образцы (навески) глины и кварцевого песка (средний размер зерна песчаных частиц 0,1...0,25 мм). Все образцы смачивались водой в количестве 30% сухой массы. Изготавливались четыре типа образцов, отличавшихся между собой содержанием глинистых частиц: 0, 30, 70 или 100% соответственно. Каждый тип был представлен 30 образцами.

С помощью лабораторной установки (рис. 1), каждому образцу сообщалась и поддерживалась в ходе эксперимента определенная одноосная нагрузка.

Образец 1 влажного грунта помещался в металлическую оболочку 2, содержащую в донной части волновод 3 во фторопластовой опалубке (защита от фоновых шумов), соединенный с приемным преобразователем 4 акустической эмиссии. Оболочка 2 закупоривалась металлическим цилиндром 5, по периметру которого были установлены два уплотнительных кольца 6. Они исключали выдавливание грунта из оболочки при сообщении цилиндру механической нагрузки с помощью ромбовидного домкрата 7. Процесс нагружения контролировался динамометром 8. После достижения заданной нагрузки положение прижимной плиты 9 фиксировалось по высоте направляющих стержней 10 гайками 11, что позволяет сохранить действующую нагрузку после ее снятия с домкрата. Ограниченная плитами 9 и 12, конструкция вынималась из-под домкрата и помещалась в морозильную камеру типа SE 10-45, где охлаждалась до минус 40°C и выдерживалась при этой температуре в течение не менее 90 мин, что гарантировало смерзание влажного образца в единую ледопородную матрицу. Затем производилось отключение морозильника и с помощью трансформатора 13 подавалось регулируемое электрическое питание на нагревательные элементы 14, сообщавшие центральной части образца температуру 180°C в течение не менее 60 мин, что гарантировало разрушение ледопородной матрицы.

Измерение и регистрация параметров акустоэмиссионного отклика осуществлялись на стадиях заморозки и оттаивания с помощью акустико-эмиссионной системы A-Line 32D 15.

Описанный режим комплексного термического и механического нагружений воспроизводит условия, которые будут справедливы для термоакустоэмиссионного контроля массива мерзлых грунтов, находящегося в одноосном напряженно-деформированном состоянии. Для оценки последнего использовались активность акустической эмиссии и средняя за единицу времени длительность импульса.

Активность  $\dot{N}_\Sigma$  ТАЭ отражает число событий деструкции в объекте за единицу времени. При оттаивании  $\dot{N}_\Sigma$  показывает интенсивность процесса разрушения ледопородной матрицы, а в ходе замораживания – характеризует деформации грунта, возникающие под воздействием механической нагрузки и увеличение объема содержащейся в нем жидкости при ее переходе в твердое состояние. Следовательно, средняя активность  $[M(\dot{N}_\Sigma)^3]$  ТАЭ, рассчитанная относительно временной области, когда уже полностью сформировалась ледопородная матрица, характеризу-

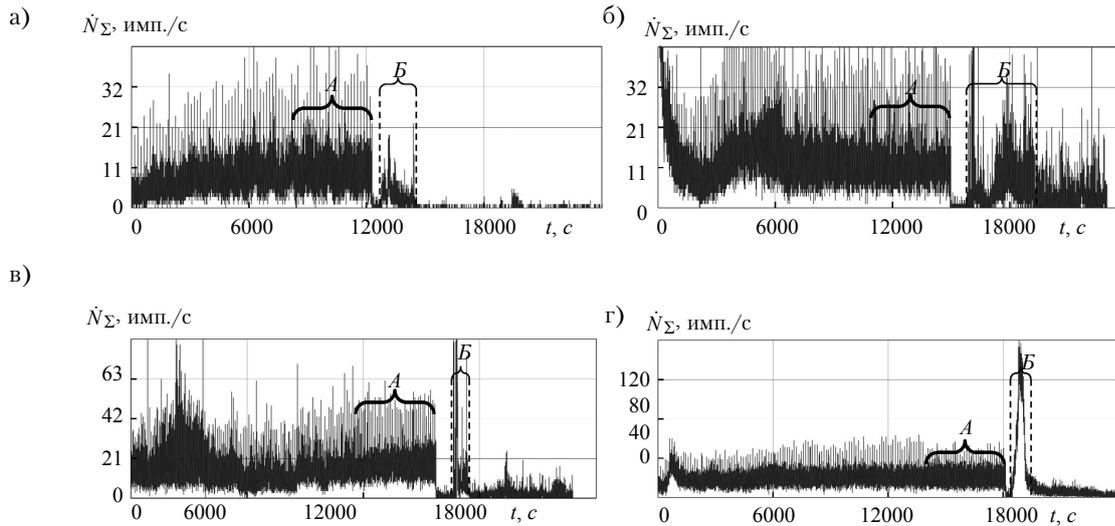


Рис. 2. Характерный вид акустограмм мерзлого грунта, находящегося в напряженном состоянии с процентным соотношением глина/песок: 100/0 (а), 70/30 (б), 30/70 (в) и 0/100 (г)

ет способность последней выдерживать действующие напряжения. В свою очередь величина  $[M(\dot{N}_\Sigma)^n]$ , определенная для области оттаивания, показывает интенсивность дефектообразования в породе, лишенной ледового каркаса (матрицы). Однако использовать абсолютные значения  $M(\dot{N}_\Sigma)^n$  и  $M(\dot{N}_\Sigma)^3$  для оценки прочностных свойств геоматериала некорректно, так как на них оказывает влияние ряд случайных факторов: неравномерность размера и распределения жидких включений по объему, неоднородность вещественного состава твердой фазы, зернистость и т.п. В то же время, как следует из результатов экспериментов, эти случайные факторы пропорционально влияют на уровень  $\dot{N}_\Sigma$  как при нагреве, так и при замораживании. Вследствие этого, рассчитав отношение  $[M(\dot{N}_\Sigma)^n]/[M(\dot{N}_\Sigma)^3]$  можно получить свободный от влияния случайных факторов безразмерный коэффициент структурной стабильности (связанности частиц грунта после его размораживания)  $k_s$ , показывающий изменение интенсивности дефектообразования в грунте после разрушения ледовой матрицы.

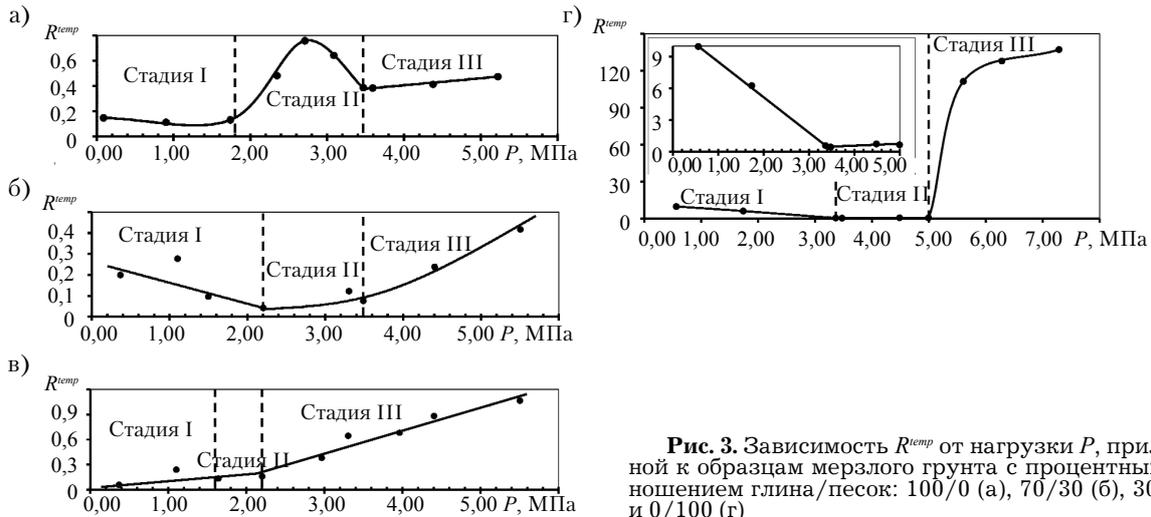
В свою очередь такой параметр как средняя длительность импульса ТАЭ ( $D_{imp}$ ) показывает время, которое требуется напряжениям, чтобы разрушить средний структурный элемент объекта (структурную связь). На  $D_{imp}$ , как и на  $M(\dot{N}_\Sigma)$ , оказывают влияние такие факторы как: солесодержание, аномальные по вещественному составу включения, зернистость и т.п. Поэтому абсолютные значения  $D_{imp}$  также следует нормировать к безразмерному коэффициенту  $K^{imp} = D_{imp}^n / D_{imp}^3$ , показывающему отношение  $D_{imp}$ , усредненных относительно временных областей нагрева и заморозки соответственно.

Таким образом, коэффициент  $K^{imp}$  показывает отношение отрезков времени, в течение которых структурные связи грунта способны выдержать действующую на них нагрузку на стадиях разрушения ледовой матрицы и заморозки (когда ледовая матрица уже полностью сформирована), а коэффициент  $k_s$  – изменение количества структурных связей, разрушенных при заморозке и оттаивании. Отношение  $k_s / K^{imp} = R^{temp}$  является критерием изменения скорости дефектообразования при различной интенсивности криологических процессов, протекающих в грунте, от воздействующей на него внешней механической нагрузки.

### Обработка и интерпретация результатов экспериментов

Характерный вид акустограмм различных по вещественному составу образцов представлен на рис. 2. Нетрудно заметить тенденцию к уменьшению уровня активности ТАЭ во время отогрева образца (область Б) при возрастании содержания в нем связующего глинистого материала.

На рисунке отмечена часть временного интервала, соответствующего полной заморозке образца (область А). Правая граница этой части соответствует началу оттаивания образца, а левая во всех случаях отстоит от правой на 4000 сек. Выбранная протяженность области А установлена с целью нормирования процедуры расчета, ее изменение в любую сторону практически не сказывается на  $M(\dot{N}_\Sigma)^3$  и  $D_{imp}^3$ , рассчитываемых относительно этой области. Единственным критическим граничным условием служит окончание формирования ледопородной матрицы, что занимает не



**Рис. 3.** Зависимость  $R^{temp}$  от нагрузки  $P$ , приложенной к образцам мерзлого грунта с процентным соотношением глина/песок: 100/0 (а), 70/30 (б), 30/70 (в) и 0/100 (г)

более первых 6000 сек. каждого эксперимента. Другими словами,  $M(\dot{N}_\Sigma)^3$  и  $D_{imp}^3$ , рассчитанные относительно любого значимого временного интервала, лежащего в промежутке от окончания промерзания образца и до начала его оттаивания, будут примерно одинаковы.

Область *Б* соответствует разрушению единой ледовой матрицы, воспринимающей часть приложенной к образцу нагрузки. О факте такого разрушения судили по более чем двукратному возрастанию активности ТАЭ относительно уровня фоновых шумов. Дотаивание отдельных частей ледовой матрицы (например, расположенных в сердцевине образца) разумеется происходило и позже, но их наличие практически не сказывалось на способности образца выдерживать приложенную нагрузку. Соответственно, рассчитанные относительно области *Б* значения  $M(\dot{N}_\Sigma)^u$  и  $D_{imp}^u$  характеризуют изменение связанности частиц грунта в ходе перераспределения действующих в нем напряжений при постепенном удалении цементирующей их ледовой матрицы. После разрушения единой ледовой матрицы формируется новое равновесное состояние, а интенсивность дефектообразования и уровень активности ТАЭ возвращаются к фоновым значениям.

Изменение критерия  $R^{temp} = k_s / K^{imp} = ([M(\dot{N}_\Sigma)^u] D_{imp}^3) / ([M(\dot{N}_\Sigma)^s] D_{imp}^u)$  в зависимости от приложенной к образцу одноосной нагрузки показано на рис. 3. Точки, описывающие участки, где происходит изменение тренда зависимостей (экстремальные области), являются осредненным результатом испытаний не менее трех образцов.

На графиках можно выделить три области, соответствующие предложенной проф. Н.М. Герсевановым в 1930 г. классификации напряженного состояния грунтов под штампом:

*I (стадия упругих деформаций – нормального уплотнения).* На стадии упругих деформаций и даже в начале стадии сдвигов зависимость деформаций от напряжений близка к линейной, также, как и соответствующие области зависимостей  $R^{temp} - P$  (см. рис. 3). Характерные для данной стадии деформации достаточно малы, так как напряжения не превышают структурной прочности, которая обусловлена кристаллизационными связями. Происходит миграция воды в поровом пространстве, идет процесс уплотнения грунта и удаление содержащихся в нем воздушных включений. Перемещения частиц грунта направлены преимущественно по вертикали, под подошвой формируется область (ядро) уплотненного грунта.

*II (стадия сдвиговых деформаций).* Продолжается уплотнение грунта за счет обжатия его скелета, возникают сдвиговые деформации, формируются концентраторы напряжений и, как следствие, области, в которых прочность грунта исчерпана. Следует заметить, что при нагружении песчаного грунта преобладающим является процесс уплотнения его частиц, носящий практически линейный характер, а в случае песчано-глинистых грунтов, вместе с процессом уплотнения проявляется ползучесть, характер которой существенно нелинейный. С возрастанием содержания глинистых частиц роль ползучести повышается, и кривая зависимости  $R^{temp} - P$  все больше отклоняется от линейной.

*III (стадия разрушения – вытирания).* В натуральных условиях у рыхлых геоматериалов на данной стадии область сдвига выходит на внешнюю поверхность, после чего происходит разрушение основания источника механического нагружения с провальной осадкой. Что касается рас-

смаатриваемой серии экспериментов, в которых испытуемый грунт размещался в жесткой металлической опалубке, полученные в стадии III значения  $R^{temp}$  отражают изменение скорости разрушения агрегатов частиц грунта и консолидирующих их структурных связей при возрастании механической нагрузки.

Таким образом, характер полученных зависимостей  $R^{temp} - P$  согласуется с существующими теоретическими представлениями о стадийности напряженно-деформированного состояния грунтов. Помимо этого, из рис. 3 следует сходимость характера зависимостей  $R^{temp} - P$  для грунтов различного состава. Единственное отличие заключается в изменении степени линейности зависимостей на стадии сдвигов (область II), что, как уже говорилось выше, обусловлено отличиями в реализации процессов консолидации и ползучести у песчаных и глинистых частиц.

Резкое изменение зависимости  $R^{temp} - P$  при переходе из стадии сдвигов в стадию разрушения песчаных образцов связано с достижением действующими напряжениями уровня, сопоставимого с пределом прочности отдельных частиц (условно "песчинок"). Каждая из них значительно деформируется и становится источником ТАЭ, так как воспринимает давление на сравнительно малой контактной площади поверхности. В свою очередь, у образцов, имеющих в своем составе глинистый цемент, источниками ТАЭ являются глинистые конгломерации, в которых происходит перераспределение приложенных к грунту напряжений и, как следствие, интенсивного дефектообразования не наблюдается.

Во всех случаях (кроме испытаний полностью песчаных образцов),  $R^{temp} < 1$ . Это связано с тем, что ледовая матрица по сравнению с немерзлым грунтом гораздо менее пластична и поэтому при той же нагрузке испытывает большие деформации и, соответственно, генерирует большее число событий акустической эмиссии. Однако деформации ледового каркаса частично (в функции от механической нагрузки) обратимы, т.е. могут быть залечены при сохранении морозного воздействия. Из этого следует, что хотя в общем случае на стадии заморозки грунта в нем образуется больше дефектов, они не так опасны как те, которые формируются в ходе его растепления. Также из этого следует, что для оценки состояния грунта важен не численный критерий  $R^{temp}$ , а его относительное изменение в зависимости от времени или действующей нагрузки.

При размещении каких-либо объектов в грунтовом массиве, действующие в нем напряжения должны быть достаточно далеки от разрушающих, т.е. грунт должен работать в стадии уплотнения (упругих деформаций) / начале стадии сдвигов. Полученный результат открывает возможность использования метода термостимулированной акустической эмиссии для оценки изменения напряженно-деформированного состояния грунта и, в том числе, для определения предельного давления, которое этот грунт сможет выдержать без серьезных просадок. Ясно, что для использования полученных результатов при термоакустоэмиссионных измерениях в натуральных условиях необходимы дальнейшие исследования. В частности, при переходе от измерений на образцах к контролю массива следует определить и учесть влияние масштабного фактора на результаты контроля, а также сформулировать требования к соответствующему аппаратурно-методическому комплексу.

### Выводы

Показана возможность использования метода термостимулированной акустической эмиссии для оценки скорости дефектообразования у находящихся в напряженном состоянии образцов мерзлых грунтов при их локальном оттаивании. На основе результатов экспериментов создано и обосновано методическое обеспечение, позволяющее исследовать напряженно-деформированное состояние грунтов различного гранулометрического состава и интенсивности протекающих в них криологических процессов. Получаемый при реализации предлагаемой методики численный критерий свободен от влияния таких случайных факторов как, – наличие аномальных по вещественному составу включений, зернистость, влагосодержание и т.п. Открывается принципиальная возможность использования метода термостимулированной акустической эмиссии для контроля состояния массива мерзлых грунтов в натуральных условиях, когда количественная оценка указанных выше случайных параметров невозможна.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-35-00105 мол\_а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Озган Э., Серин С., Эртюрк С., Вурал И. Влияние циклов замораживания и оттаивания на инженерные свойства грунтов // "ОФМГ". - 2015. - № 2. - С. 21.
2. Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И. Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов северного полушария в XXI веке // Криосфера Земли. - 2010. - Т. XIV. - № 3. - С. 37-42.
3. Котов П.И., Роман Л.Т., Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Парамонов М.В. Влияние условий оттаивания и вида испытаний на деформационные характеристики оттаивающих грунтов // "ОФМГ". - 2015. - № 5. - С. 8-13.
4. Иванов И.А., Мосягин М.Н., Хабибуллин Ф.Х., Гостев В.В. Результаты исследования несущей способности и динамической вязкости глинистых грунтов с учетом температурного фактора // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2001. - № 4. - С. 62-65.
5. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. - М., 2007. - 272 с.
6. Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. - 2014. - Т. XVIII. - № 2. - С. 83-90.
7. Лавров В.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал (в приложении). - 2005. - Т. 51. - С. 6-18.
8. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Вознесенский А.С., Винников В.А. Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах (монография). - М.: Издательство "Горная книга", 2015. - 241 с.
9. Song-Tao Zhai, Gang Wu, Yuan Zhang. Research on Characteristics of Microstructure and Acoustic Emission of Marble in the Heating Process // International Society for Rock Mechanics, SINOROCK. - Shanghai, 2013. - Pp. 245-250.
10. Zhang Z.Z., Xu X.L., Sun Q.P. and Dong Y. Effect of Thermal Treatment on Fractals in Acoustic Emission of Rock Material // Advances in Materials Science and Engineering. - 2016. - Pp. 1-9.
11. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. Correlation of thermally induced acoustic emission and ultimate compression strength in hard rocks // Journal of Mining Science. - 2012. - Vol. 48. - № 4. - Pp. 629-635.
12. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials // Journal of Mining Science. - 2012. - Vol. 48. - № 1. - Pp. 9-14.
13. Jin-wen, Zhao Yang-sheng, Wan Zhi-jun, Dong Fu-ke, Feng Zi-jun, LI Yi. Experimental study of acoustic emission characteristics of granite thermal cracking under middle-high temperature and triaxial stress // Rock and Soil Mechanics. - 2009. - № 30 (11). - Pp. 3331-3336.
14. Jiang Hai Kun, Zhang Liu, Zhou Yong Sheng. Characteristics of AE temporal sequences in the process of deformation and failure of granite at high pressure and different temperatures // Earthquake. - 2000. - № 3.
15. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. and Oshkin R.O. Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression // Journal of Mining Science. - 2014. - Vol. 50. - № 2. - Pp 249-255.
16. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Oshkin R.O. Acoustic emission patterns as guides to unfrozen water in frozen soils // Kriosfera Zemli. - 2016. - Vol. XX. - № 1. - Pp. 91-94.

УДК 624.131.55

**ОСАДКА ОСНОВАНИЙ, СЛОЖЕННЫХ СЛАБЫМИ ГЛИНИСТЫМИ ГРУНТАМИ, ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ВЫЗВАННЫХ ДВИЖЕНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ**

*Полный текст статьи будет опубликован в английской версии журнала "Soil Mechanics and Foundation Engineering".*

**ШЕН ЯН, СЮЙ ХАЙДУН, ВАН БАОГУАН, СОНГ ШУНКСИН**

Лаборатория Геомеханики и проектирования набережных Хохайского технического университета (Нанкин, Китай).

**ТАО МИНГАН**

Третий проектный железнодорожный институт (Тяньцзинь, Китай).

Исследуются закономерности деформирования оснований, сложенных слабыми глинистыми грунтами при воздействии циклических нагрузок, вызываемых движением высокоскоростных поездов. На основании лабораторных экспериментов получены зависимости, описывающие развитие пластических деформаций и изменение порового давления в водонасыщенных грунтах в зависимости от параметров динамического нагружения: частоты  $f$  и соотношения  $\eta = q/p_0$ , где  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ;  $p_0$  - начальное среднее эффективное напряжение. На основании полученных результатов и положений стандартов Германии предложен метод расчета осадок, учитывающий резонансные возможности.