

Белых А.Г., с. н. с.,  
Скляров А.Н., канд. техн. наук, доц.,  
Кукарских Л.А., канд. физ.-мат. наук, с. н. с.  
Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТОБЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

sunstroke-777@mail.ru

*В статье описывается методика определения статической и усталостной прочности цементобетона при сложном нагружении. При проведении испытаний используется разработанная авторами экспериментальная установка. В исследованиях применяется метод акустической эмиссии. Авторами определены критерии наступления предельного состояния цементобетона. Установлена взаимосвязь между стадийным разрушением структуры цементобетонного материала и изменениями спектра сигналов акустической эмиссии, сопровождающих процесс.*

**Ключевые слова:** цементобетон, аэродромные покрытия, акустическая эмиссия, статическая прочность, усталостная прочность, режимы нагружения.

**Введение.** Анализ результатов обследования технико-эксплуатационного состояния покрытий ряда аэропортов и аэродромов России, показал, что их техническое состояние значительно ухудшилось. Причинами этого ухудшения является нарушение технологии строительства, неправильная эксплуатация, несвоевременное выявление дефектов и их ремонт [1].

Для оценки надежности работы аэродромных покрытий очень важным является получение объективных данных об их состоянии, что позволяет своевременно выявлять дефекты, оценивать объемы ремонтных работ и, следовательно, рационально и экономно использовать силы и средства на поддержание состояния аэродромов в постоянной эксплуатационной готовности [2]. Эти обстоятельства указывают на необходимость совершенствования существующих методов оценки эксплуатационного состояния бетонных аэродромных покрытий, которые бы более точно учитывали многоцикловые знакопеременные нагрузки многоколесных опор воздушного судна на жесткие покрытия [1].

При определении значения качественных показателей прочности и надежности используют визуальный и инструментальный контроль состояния покрытия. В отличие от визуального контроля, инструментальный метод позволяет обнаружить скрытые дефекты и повреждения. Наряду с получением параметров, характеризующих состояние покрытия в текущий момент времени большое значение имеет измерение параметров покрытия в момент воздействия на искусственное покрытие и прогнозирование его состояния.

Инструментальные методы контроля позволяют контролировать заданную прочность,

жесткость, трещиностойкость конструкций покрытий; размеры плит, прочность железобетона в конструкции; вид, класс и механические свойства арматурной стали; качество выполнения сварных соединений арматуры и закладных элементов; диаметр, количество и расположение арматуры в железобетоне; толщину защитного слоя бетона и т.п.

В последние годы для контроля качества бетона и железобетонных конструкций получил распространение метод акустической эмиссии. Явление акустической эмиссии известно давно, особенно в тех материалах, у которых частота сигналов акустической эмиссии располагается в звуковом спектре и имеет достаточную интенсивность. Основа метода акустической эмиссии заключается в возбуждении, регистрации и последующем анализе сигналов акустической эмиссии, принятых в виде волн, напряжений соответствующим преобразователем [3].

Учитывая сложность структуры бетона, нужно, прежде всего, измерять и регистрировать так называемую импульсную («избыточную») акустическую эмиссию, т.е. низкочастотные составляющие сигналов, источниками которых являются разрывающиеся микро- и макротрещины. Высокочастотные составляющие сигналов (непрерывная эмиссия), образующиеся в результате перестройки структуры материала на микроуровне (движение дислокаций, их накопление и др.), определяют поведение тех строительных материалов, которые содержат микротрещины и поры, возникающие под влиянием температурных и влажностных факторов, зависящих от особенностей технологии их производства [4].

Многолетние исследования бетонов, под-

вергающихся эксплуатационным нагрузкам, позволили сделать ряд выводов. Отмечено, что упругая энергия, освобождаемая при разрушении, возрастает с увеличением прочности бетона [5]. Регистрируя число акустических импульсов, в зависимости от приложенных напряжений, установлено, что в менее прочных бетонах при нагружении число образующихся микротрещин больше, но они меньшего размера. В низкопрочных бетонах число зарегистрированных акустических импульсов больше, чем в высокопрочных. При растяжении бетона число выделяющихся импульсов примерно вдвое меньше, чем при сжатии. Следует отметить, что бетоны низкой прочности имеют более однородную структуру, содержащую большое число концентраторов напряжений, которые при нагружении являются очагами образования микротрещин. Если прочность бетона различается в 1,65 раза, то число импульсов – почти вдвое.

В соответствии с современными представлениями о механике разрушений акустическая эмиссия позволяет выявить 4-е стадии деформирования бетона ( $R$  – предел прочности бетона):

- стадия уплотнения в границах от 0 до



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Данный комплекс позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние бетонных элементов по соответствующей методике. В ходе исследований измерялись и фиксировались следующие параметры: величины нагрузки; напряжений в бетоне; момента образования трещин; положения трещины в теле образца.

Для определения параметров НДС цементобетонных образцов использовалась следующая измерительная аппаратура и приборы:

- силоизмеритель пресса МС-1000;
- датчик вертикальных перемещений образца;
- тензометрическая станция для определения величины напряжений в бетоне;
- прибор акустической эмиссии для опреде-

ления момента образования трещин в напряженном бетоне;

- стадия появления микротрещин в границах от  $0,2R$  до  $0,75R$ , когда микродефекты возникают в локальных зонах микроразрушений и образуется развивающаяся сеть микротрещин;

- стадия появления макротрещин при уровне  $0,75R-0,96R$ , когда происходит образование магистральных трещин, выходящих на поверхность;

- активное разрушение при значениях  $0,96R$  и выше [6].

На практике акустическая эмиссия позволяет контролировать поведение конструкций под различными нагрузками, а также прогнозировать образование трещин и оценивать состояние структуры бетона.

**Методика.** Для производства статических и ресурсных испытаний цементобетонных образцов была разработана экспериментальная лабораторная установка (рис. 1).

Установка состоит из следующих агрегатов: источника силовой энергии (1), пульта управления (2), измерительного комплекса (3), нагружающего устройства (4).

ления момента образования трещин в напряженном бетоне;

- ультразвуковой прибор для определения основных параметров бетона (скорость ультразвука, коэффициент поглощения) и положения трещины в напряженном бетоне.

Определение местоположения дислокационных изменений, вызванных большими величинами напряжений в материале цементобетона, а также их спектрального состава, необходимого для идентификации акустических сигналов от различных источников помех осуществляется с помощью прибора акустической эмиссии. Общий вид блока сбора и обработки информации представлен на рис. 2.

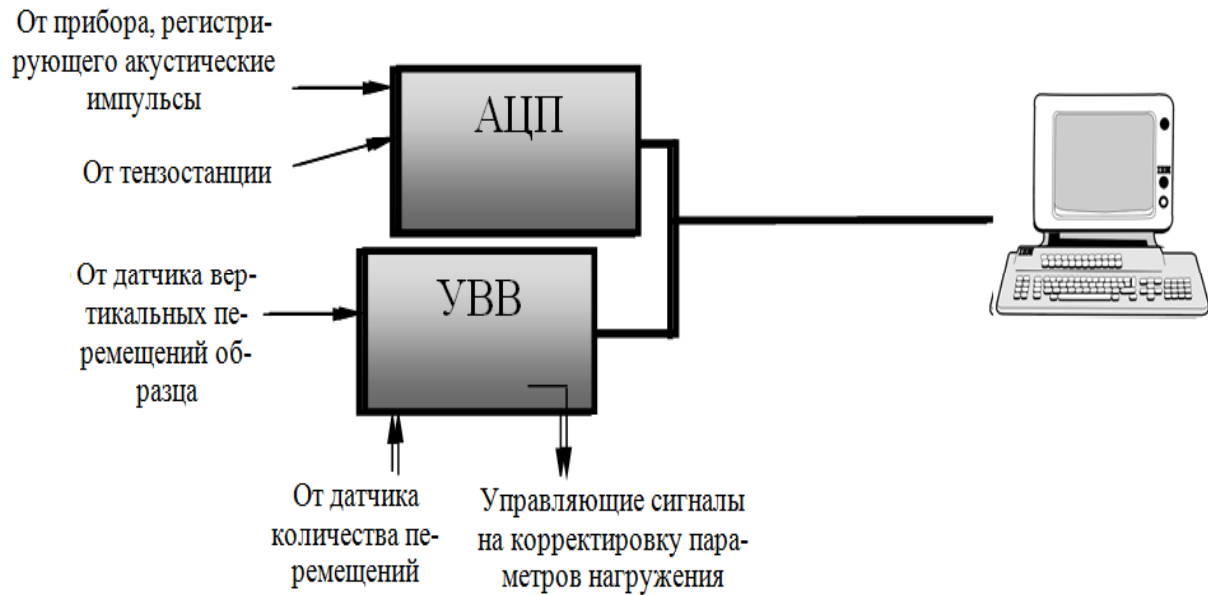


Рис. 2. Схема блока сбора и обработки информации

Погрешность измерительного комплекса определялась:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_m^2 + 2\delta_{yc}^2 + 2\delta_{АЦП}^2 + \delta_l^2}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\Sigma}$  – возможная погрешность, возникающая в следствии влияния погрешностей в измерительной схеме и ошибок, допускаемых при обработке величин;  $\delta_m$  – погрешность показания тензодатчиков;  $\delta_{yc}$  – погрешность, возникающая при работе усилителя;  $\delta_{АЦП}$  – погрешность, возникающая при обработке выборок АЦП;  $\delta_l$  – погрешность, возникающая в следствии изменения проводимости проводников при воздействии внешних факторов. Ошибка измерений составляла 8–10 %.

**Основная часть.** Блок сбора информации состоит из четырех пьезодатчиков, преобразующих импульсы механических колебаний в электрические сигналы, поступающие на предварительный усилитель, который поднимает уровень сигнала до необходимого для последующего преобразования и поступают далее на входы АЦП, для обеспечения обработки высокочастотных спектральных составляющих сигнала, дискретизация производится на частоте:

$$F_{ацп} = N_k \times n_e \times f_{max}, \quad (2)$$

где  $N_k$  – количество каналов;  $n_e$  – число выборок,  $f_{max}$  – максимальная частота спектра.

Частота выборок АЦП  $F_{ацп} \approx 1,6$  МГц.

Сигналы от измерительных приборов подаются на измерительный комплекс на базе персональной вычислительной машины. Отсчеты производятся совместно с измерениями параметров акустической эмиссии и характери-

ками нагружения.

Преобразование аналоговых сигналов производится при помощи блока аналого-цифрового преобразования. В связи с большим количеством поступающей информации в единицу времени и сложностью задания параметров нагружения, вся информация обрабатывается сигнальным процессором. Для управления элементами автоматики установки, в комплект устройства дискретного ввода-вывода.

На входы аналого-цифрового преобразователя поступают сигналы от тензометрической станции, измеряющей деформации бетонных элементов и сигнал с прибора, регистрирующего акустические импульсы.

На цифровой ввод ПЭВМ поступают логические сигналы от датчика вертикальных перемещений образца и от датчика числа нагружений.

Полученные данные обрабатываются с помощью прикладной программы. Результаты сохраняются в памяти ПЭВМ и выдаются управляющие сигналы на корректировку параметров нагружения, также на мониторе отображается информация, указывающая места концентрации напряжений – наиболее вероятные места образования микрповреждений.

Блок-схема прибора представлена на рис. 3.

Проведенный с помощью вычислительного комплекса на основе метода конечных элементов расчет, также подтвердил возникновение циклических знакопостоянных и знакопеременных нагружений, возникающих при воздействии на аэродромные покрытия воздушных судов и, как следствие, необходимость совершенствования существующих методик оценки и прогнозирования эксплуатационного состояния покры-

тия.

Таким образом, данный измерительный комплекс позволяет отслеживать одновременно несколько параметров напряженно-деформированного состояния на всех этапах

проведения испытаний, вести их статистическую обработку и накопление, а также, при заданных условиях выдавать управляющие сигналы на корректировку параметров нагружения.

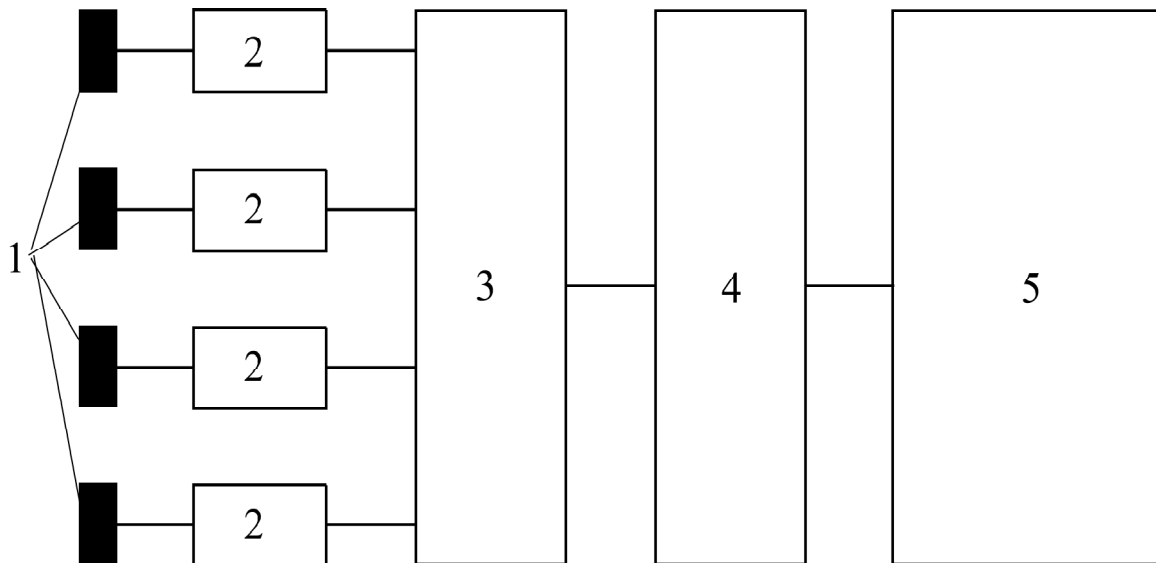


Рис. 3. Блок – схема измерительного прибора акустической эмиссии

1 – датчики акустической эмиссии; 2 – предусилители сигнала акустической эмиссии; 3 – аналого-цифровой преобразователь сигналов акустической эмиссии; 4 – цифровой сигнальный процессор обработки сигналов акустической эмиссии; 5 – персональная вычислительная машина

Экспериментальная установка по производству статических и динамических испытаний после изготовления и опробования была подвргнута метрологическому контролю.

При статических испытаниях бетонных балок определялись напряжения в бетоне растянутой зоны до образования трещин [7], момент появления трещин, развитие трещин по длине и ширине, расстояние между трещинами. При этом анализу подвергались три наиболее характерные (крупные) трещины. Целью статических испытаний являлось установление величины статической разрушающей нагрузки для сопоставления ее с величиной разрушающей нагруз-

ки при усталостных испытаниях.

Критерием потери прочности бетонных образцов являлось появление магистральных трещин разрушения.

Прочность бетона на растяжение при изгибе согласно требованиям определяли путем испытания образцов в возрасте трех месяцев [8, 9]. Образцы в процессе испытаний нагружали с постоянной скоростью нарастания напряжений (0,05±0,02) МПа/с. На каждой ступени производились замеры ширины раскрытия трещин и фиксировалась нагрузка. Графические результаты обработки экспериментальных данных представлены на рисунках 4, 5, 6.

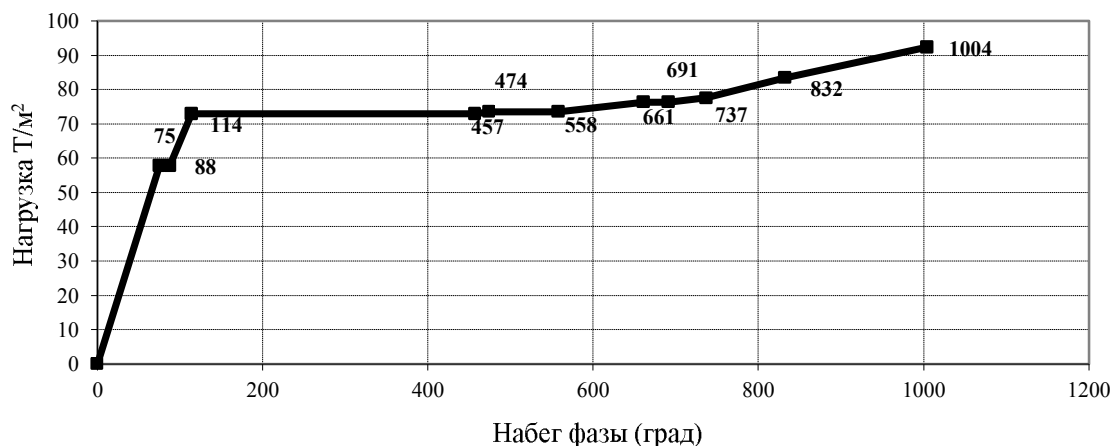


Рис. 4. Зависимость суммарного набег фазы сигнала от нагрузки

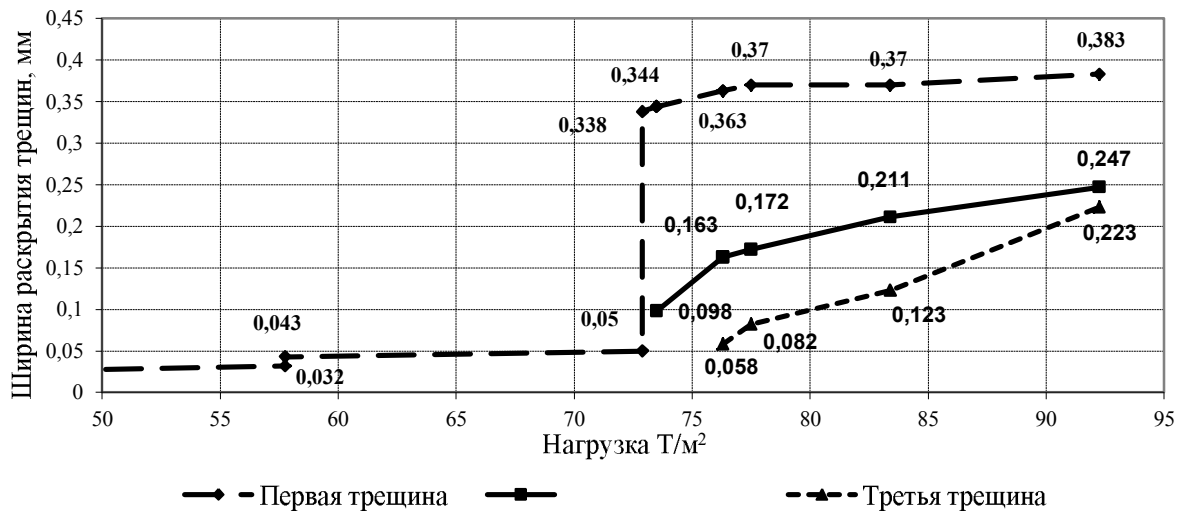


Рис. 5. Ширина раскрытия трещин в зависимости от нагрузки

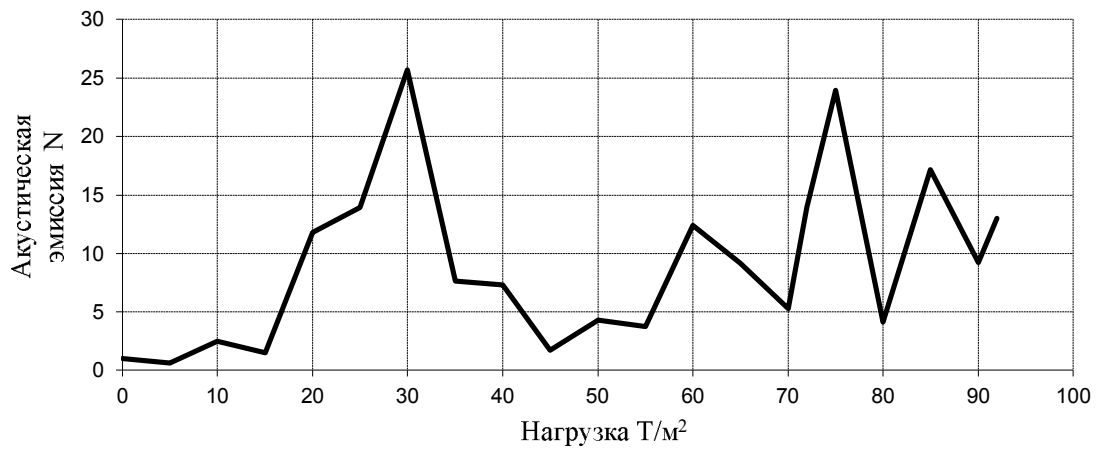


Рис. 6. Зависимость акустического спектра от нагрузки

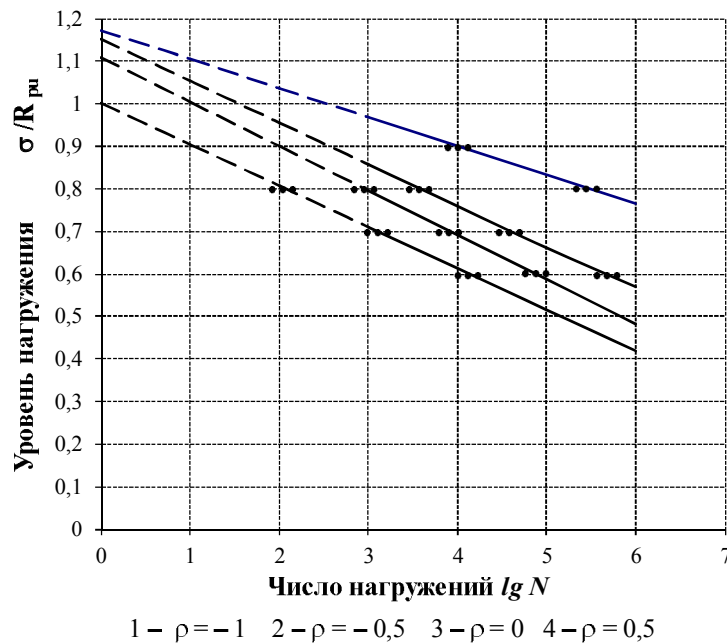


Рис. 7. Линии регрессии по результатам усталостных испытаний.  $lg N$  – логарифм числа циклов, соответствующий пределу выносливости;  $R_{pu}$  – предел прочности материала на растяжение при изгибе

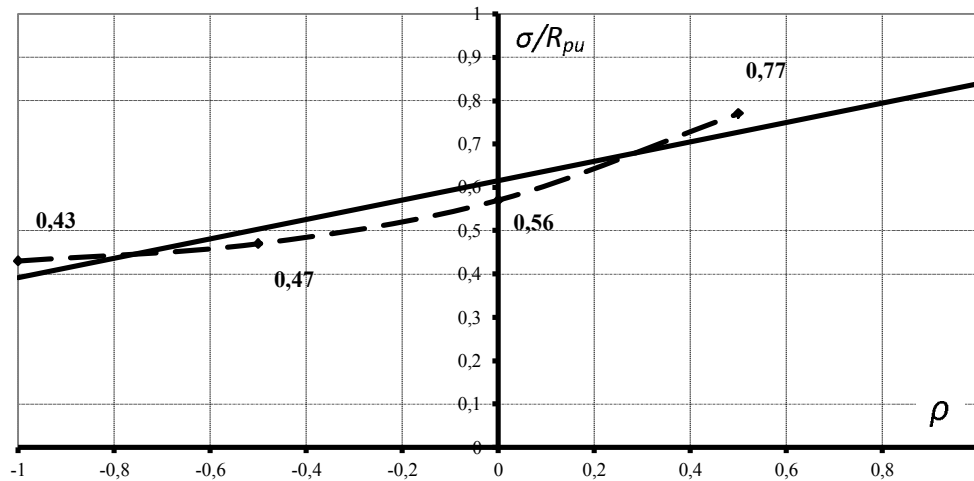


Рис. 8. Зависимость предела выносливости от коэффициента асимметрии цикла нагружения

Зависимость усталостной прочности железобетона от характеристики цикла нагружения наиболее удобно представлять в полулогарифмической системе координат (рис. 7).

Значения коэффициентов А при  $\rho = 0,5$  и  $\rho = 0$  превышает единицу. Это явление возможно объяснить наличием у бетона эффекта динамического упрочнения, возникающего при малых числах нагружений и высокой скорости при проведении испытаний. В данной работе значение этих коэффициентов принято по интерполяции прямых в область малоциклового усталости.

Анализ корреляционных уравнений позволяет сделать следующие выводы:

- при возрастании коэффициента асимметрии цикла  $\rho$  от -1 до 0,5 коэффициент выносливости испытываемых образцов увеличивается от 0,43 до 0,77;

- при возрастании амплитуды напряжений коэффициент выносливости железобетона уменьшается;

- нагружение циклической нагрузкой, когда изменяется не только величина, но и знак нагрузки ( $\rho < 0$  – знакопеременные циклы), значительно опаснее знакопостоянных циклов;

- при определении выносливости железобетонных образцов необходим учет напряжений, величина которых больше 40 %-ой величины разрушающей нагрузки.

Графически результаты исследований выносливости цементобетона при различных  $\rho$  можно представить зависимостью  $\sigma_{max} / R_{pu} - \rho$  (рисунок 8).

На основании экспериментальных данных по линейной зависимости определена выносливость монолитного цементобетона при  $\rho = 1$  (т.е. при длительном нагружении), которая составляет 0,84  $R_{np}$  (рис. 8). Величина полученной дли-

тельной прочности цементобетона сопоставима с результатами исследований других авторов.

Корреляционное уравнение имеет вид:

$$\sigma/R_{pu} = 0,616 + 0,224 \cdot \rho \quad (3)$$

**Выводы.** Разработана установка для экспериментальных исследований по определению статической и усталостной прочности цементобетона при различных режимах нагружения. Усовершенствована методика проведения измерений и определения НДС бетонных образцов. Проведены статические испытания и определена статическая прочность бетонных образцов. Исследована зависимость усталостной прочности от режима нагружения (уровня нагружения и коэффициента асимметрии цикла).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Н.Е., Кульчицкий В.А., Мокогонов В.А. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. М.: Физико-математическая литература, 2002. 528 с.
2. Белых А.Г., Кукарских Л.А. Распространение ударных волн в бетонных покрытиях аэродрома при силовом воздействии колесных опор воздушных судов // Международный научный институт «Educatio». 2014. № 4. С. 128–131.
3. Семашко Н.А., Шпорт В.И. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
4. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 276 с.
5. Грушко И.М., Алтухов В.Д. Вопросы теории структуры, прочности и разрушения бетонов // Технологическая механика бетона. 1986. С. 15–29.
6. Зайцев Ю.В. Моделирование деформации

и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.

7. Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical-DamageMechanics. PartI: Theory // AppliedMechanics. 2005. V.72, № 1.P. 76–85

8. ГОСТ 28570-90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций. М.: Изд. стандартов, 1990. 22 с.

9. ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. М.: Изд. стандартов, 1987. 23 с.

---

**Belikh A.G., Sklyarov A.H., Kukarskikh L.A.**

**RESEARCH STATIC AND FATIGUE STRENGTH OF CONCRETE UNDER LOADING CONDITION WITH USAGE ACOUSTIC EMISSION METHOD**

*The article describes the method of determining the static and fatigue strength of concrete under complex loading. When tests developed by the authors used experimental setup. Research method of acoustic emission. The authors defined criteria for the occurrence of the limit state of concrete. The relationship between phasic destruction of structure of concrete material and the changes of the spectrum of acoustic emission signals accompanying the process.*

**Key words:** concrete, airdrome cover, acoustic emission, static capacity, fatigue, loading conditions.

---

**Белых Антон Геннадьевич**, старший научный сотрудник 4 научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (боевого применения и обеспечения Военно-воздушных сил).

Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

Адрес: Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

E-mail: sunstroke-777@mail.ru

**Скляров Алесандр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-аэродромного обеспечения.

Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

Адрес: Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

E-mail: alex\_skl@rambler.ru

**Кукарских Любовь Алексеевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник 4 научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (боевого применения и обеспечения Военно-воздушных сил).

Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

Адрес: Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

E-mail: kukarskih.liubov@yandex.ru