

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, Том 9, № 4 / 2022, Vol. 9, No 4 <https://t-s.today/issue-4-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS422.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS422 (<https://doi.org/10.15862/02SATS422>)

Исследование статической и усталостной прочности железобетонных образцов, нагружаемых с учетом характеристик, возникающих в процессе осуществления взлетно-посадочных операций воздушных судов на аэродромных покрытиях

Скляров А.Н., Вартазарова А.Э., Мартынов А.К.

ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия

Автор, ответственный за переписку: Вартазарова Анастасия Эдуардовна, e-mail: an_vartazarova@mail.ru

Аннотация. В статье показано, что воздействие воздушных судов с многоколесными опорами на аэродромные покрытия носит циклический характер, в результате которого в материале возникают знакопостоянные и знакопеременные напряжения. Представлены результаты расчетов параметров циклического нагружения покрытий при воздействии воздушных судов с многоколесными опорами (коэффициент асимметрии цикла нагружения, значения максимального и минимального напряжений цикла нагружения), выполненные с использованием программно-вычислительного комплекса SCAD, реализующего метод конечных элементов в форме метода перемещений. Показана необходимость проведения испытаний по определению усталостной прочности железобетона при различных режимах нагружения для ее более полного учета при определении режимов эксплуатации аэродромных покрытий, и определены параметры нагружения железобетонных образцов при их испытаниях на выносливость. Представлен общий вид и принципиальная схема экспериментальной установки по определению статической и усталостной прочности цементобетонных образцов больших размеров. Представлена методика

определения статической прочности железобетонных образцов, включающая определение критерия их разрушения (появление текучести в арматуре образца), применяемые тензометрические, ультразвуковые и акустические методы определения величин напряжений и деформаций в цементобетоне и арматуре конструкции, показана динамика изменения измеряемых параметров на одном из образцов. Представлены результаты усталостных испытаний железобетонных образцов с размерами 1500х400х200 мм при различных режимах нагружения, на основе которых получены уравнения регрессии по определению количества циклов нагружения до разрушения, и получены коэффициенты выносливости на базе 106 циклов нагружения. На основе проведенных исследований сделаны выводы, и указана необходимость разработки практических рекомендаций по учету циклического характера воздействия нагрузки от самолетов и усталостной прочности цементобетона при назначении режимов эксплуатации аэродромных покрытий.

Ключевые слова: воздействие нагрузки; воздушное судно; многоколесная опора; циклическое нагружение; коэффициент асимметрии цикла; напряженно-деформированное состояние

Study of the static and endurance strength of reinforced concrete specimens loaded with the account of the characteristics arising in the process of aircraft takeoff and landing operations on airfield pavements

Alexander N. Sklyarov, Anastasiya Eh. Vartazarova, Anton K. Martynov

Military Educational and Scientific Centre of the «Air Force N.E. Zhukovsky and
Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia

Corresponding author: Anastasiya Eh. Vartazarova, e-mail: an_vartazarova@mail.ru

Abstract. The article shows that the impact of aircraft with multi-wheel bearings on airfield pavements is a cyclical pattern, as a result, constant sign and alternating stresses arise in the material. The results of cyclic loading parameters calculations of coatings under the influence of aircraft with multi-wheeled bearings (load cycle asymmetry coefficient, values of the maximum and minimum stresses of the loading cycle), performed using the SCAD software-computer complex, which implements the finite element method in the form of the displacement method, are presented. The necessity of carrying out tests to determine the endurance strength of reinforced concrete under various loading conditions for more complete consideration in determining the operating modes of airfield pavements is shown, and the loading parameters of reinforced concrete specimens during their endurance tests are determined. A general view and a layout diagram of an experimental setup for determining the static and endurance strength of large-sized cement concrete samples are presented. A technique for determining the static strength of reinforced

concrete samples is presented, including the determination of the criterion for their destruction (appearance of fluidity in the reinforcement of the sample), the applied strain-measuring, ultrasonic and acoustic methods for determining the stresses magnitude and strains in cement concrete and structural reinforcement, the dynamics of changes in the measured parameters on one of the samples is shown. The results of the reinforced concrete samples fatigue tests with dimensions of 1500x400x200 mm under various loading conditions are presented, with reference to which regression equations were obtained to determine the number of loading cycles to failure, and endurance coefficients were obtained based on 106 loading cycles. Based on the carried out studies, conclusions are drawn, and the need to develop practical recommendations for taking into account the cyclic nature of the load impact from aircraft and the fatigue strength of cement concrete when assigning operating modes for airfield pavements is indicated. **Keywords:** load effect; aircraft; multi-wheel support; cyclic loading; cycle asymmetry coefficient; stress-strain state

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Актуальность исследования

The relevance of research

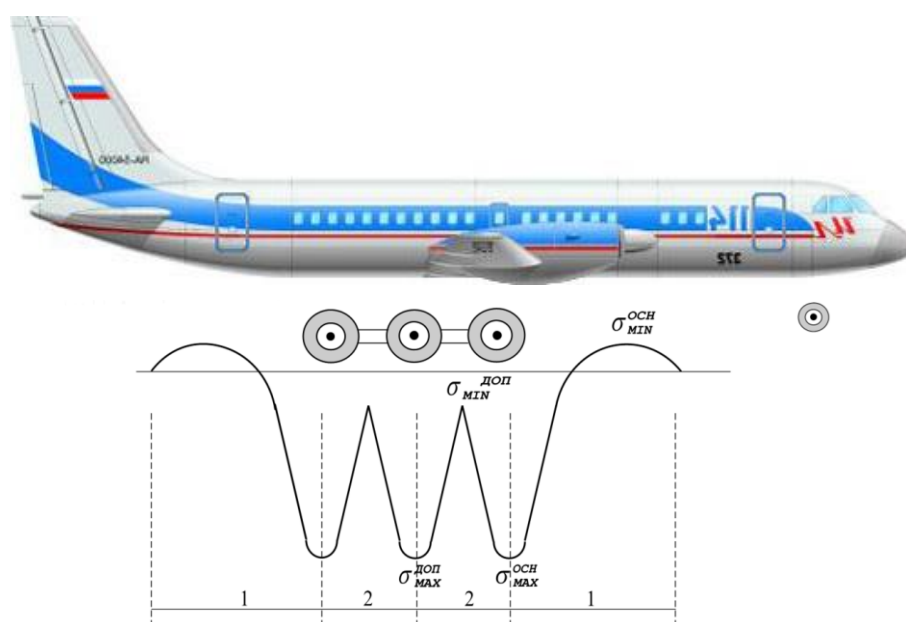
Железобетонные конструкции являются базой современной строительной индустрии. Их применяют в промышленном, гражданском и сельскохозяйственном строительстве для возведения сооружений различного назначения.

Вследствие большого количества положительных свойств, железобетон получил широкое распространение и в аэродромном (дорожном) строительстве [1–7].

Одной из причин появления дефектов цементобетонных аэродромных и дорожных покрытий являются усталостные явления, которые возникают как от общего количества выполняемых взлетно-посадочных операций, так и при однократном приложении нагрузки от воздушных судов (ВС) с многоколесными опорами (МКО) [8–12].

Разнообразие конструктивных схем основных опор самолетов и возникающие вследствие их воздействий на покрытие многократно повторяющиеся знакопостоянные и знакопеременные напряжения в общепринятых методиках представления данных о воздействии ВС на аэродромные покрытия отражаются не в полной мере. Эти методики предусматривают проведение учета повторности нагружений при воздействии ВС с МКО лишь введением коэффициента повторности (K_n), характеризующего влияние идущих след в след колес основной опоры ($ACN \leq K_n \cdot PCN$). Введение данного коэффициента основано на принципе добавления циклов нагружения с фиксированным коэффициентом асимметрии ($\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, где $\sigma_{\min}$ — минимальное напряжение цикла; $\sigma_{\max}$ — максимальное напряжение цикла, равного 0) [13; 14], что не соответствует реальным условиям работы аэродромного покрытия. Об этом свидетельствуют данные расчетов напряженно-деформированного состояния аэродромных покрытий, выполненные при помощи современных программных комплексов на основе метода конечных элементов.

Процесс циклического нагружения, возникающий в покрытии при воздействии ВС с многоколесной опорой за одну взлетно-посадочную операцию, характеризуется основным и дополнительным циклами (рис. 1) [13].



1 — основной цикл нагружения; 2 — дополнительный цикл нагружения; $\sigma_{\min}^{осн}$ — минимальное напряжение основного цикла; $\sigma_{\max}^{осн}$ — максимальное напряжение основного цикла; $\sigma_{\min}^{доп}$ — минимальное напряжение дополнительного цикла; $\sigma_{\max}^{доп}$ — максимальное напряжение дополнительного цикла

1 — main loading cycle; 2 — additional loading cycle; $\sigma_{\min}^{осн}$ — minimum stress of the main cycle; $\sigma_{\max}^{осн}$ — maximum stress of the main cycle; $\sigma_{\min}^{доп}$ — minimum stress of the additional cycle; $\sigma_{\max}^{доп}$ — the maximum stress of the additional cycle

Рисунок 1. Изменение напряжений в сечении плиты жесткого покрытия при воздействии ВС с МКО (рисунок авторов)

Figure 1. Stress changes in the cross-section of a rigid pavement slab when exposed to aircraft with multi-wheel bearings (drawing by the authors)

При анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) железобетонной плиты однослойного аэродромного покрытия, рассчитанной на нагрузку от самолета Ан-22 были определены следующие параметры НДС конструкции: максимальное напряжение в сжатой зоне бетона плиты — 2,45 МПа, максимальное напряжение в растянутой зоне бетона — 2,36 МПа, максимальное напряжение в стержневой арматуре — 7,8 МПа. Максимальный прогиб плиты составлял 0,75 мм. Коэффициент асимметрии основного цикла составил (-0,34); дополнительного цикла — (-0,26).

Также анализу подверглись аэродромные покрытия при воздействии следующих воздушных судов: Ан-22, Ан-124, Ан-12, ИЛ-76Т и Ту-160.

Результаты определения характеристики основного цикла нагружения от воздействия ВС с многоколесными опорами показывают:

- в железобетонном покрытии появляются знакопеременные напряжения;
- наибольшая величина асимметрии циклического нагружения соответствует координате вдоль оси движения ВС в сечении под колесами основной опоры;
- значение коэффициента асимметрии основного цикла от воздействия ВС с многоколесными опорами рассмотренных конфигураций находятся в пределах $(-0,42...-0,21)$, что подтверждает необходимость определения усталостной прочности железобетона при знакопеременных нагружениях.

Результаты определения характеристики дополнительного цикла нагружения показывают:

- значение коэффициента асимметрии дополнительного цикла от воздействия ВС с многоколесными опорами рассмотренных конфигураций колеблется в широких пределах $(-0,68...0,70)$;
- с уменьшением расстояния между идущими след в след колесами основной опоры значение коэффициента асимметрии дополнительного цикла уменьшается.

Выполненный численный эксперимент и анализ результатов по воздействию ВС с многоколесными опорами на железобетонные покрытия доказывает необходимость проведения экспериментальных исследований по определению усталостной прочности железобетона при знакопостоянном и знакопеременном нагружениях для их более полного учета при назначении режимов эксплуатации аэродромных покрытий (принципиальном определении возможности совершения взлетно-посадочных операций ВС на данном аэродроме).

Методы исследования

Research methods

С учетом анализа воздействия ВС с многоколесными опорами на железобетонные покрытия определены параметры нагружения железобетона для испытания на выносливость.

Основными характеристиками процесса нагружения были приняты:

- уровень нагружения $\sigma_{\max}/R_{\text{пр}}$ ($\sigma_{\max}$ — максимальное напряжение, $R_{\text{пр}}$ — призмочная прочность железобетона);
- частота нагружения f ;
- коэффициент асимметрии цикла нагружения ρ .

В качестве базы испытаний принята величина 10^6 циклов, которая назначена в соответствии с рекомендациями¹.

При испытаниях уровнями циклического нагружения являлись: верхний уровень — $0,8 R_{\text{пр}}$; средний уровень — $0,7 R_{\text{пр}}$; нижний уровень — $0,6 R_{\text{пр}}$.

Коэффициент асимметрии цикла нагружения принимался на основе анализа изменения изгибных напряжений в плитах жесткого покрытия при воздействии ВС с многоколесными опорами различных конфигураций, полученных по результатам численного эксперимента. В соответствии с рекомендациями^{2, 3}, приняты следующие значения коэффициента асимметрии цикла $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ нагружения: -1; -0,5; 0; 0,5.

Основное требование, предъявляемое к испытаниям, состоит в обеспечении стабильности разрушения, что приводит к необходимости использования образцов значительных размеров. Прочность образцов в значительной мере зависит от их размеров, и даже при полном подобии более крупные образцы оказываются менее прочными, чем образцы малых размеров. Это объясняет статистическая теория, согласно которой влияние размеров образца обусловлено присутствием в материалах случайных неоднородностей, из которых самая слабая определяет прочность. Для исключения влияния данного фактора испытания производились на образцах-балках размером $1500 \times 400 \times 200$ мм.

Задача испытательной техники состоит в том, чтобы максимально приблизить условия испытаний к реальным условиям эксплуатации и количественно определить изменение в этих условиях основных свойств материалов.

¹ ГОСТ 24545-81. Бетоны. Методы испытания на выносливость: утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 30 декабря 1980 г. № 214 срок введения установлен с 01.01.82. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 11 с.

² ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость: утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30 ноября 1979 г. № 4146 дата введения установлена 01.01.81. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 26 с.

³ СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции: утвержден Постановлением Госстроя СССР от 20 августа 1984 г. № 136. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 79 с.

Для производства статических и ресурсных испытаний бетонных и железобетонных образцов разработана экспериментальная установка (рис. 2, 3).

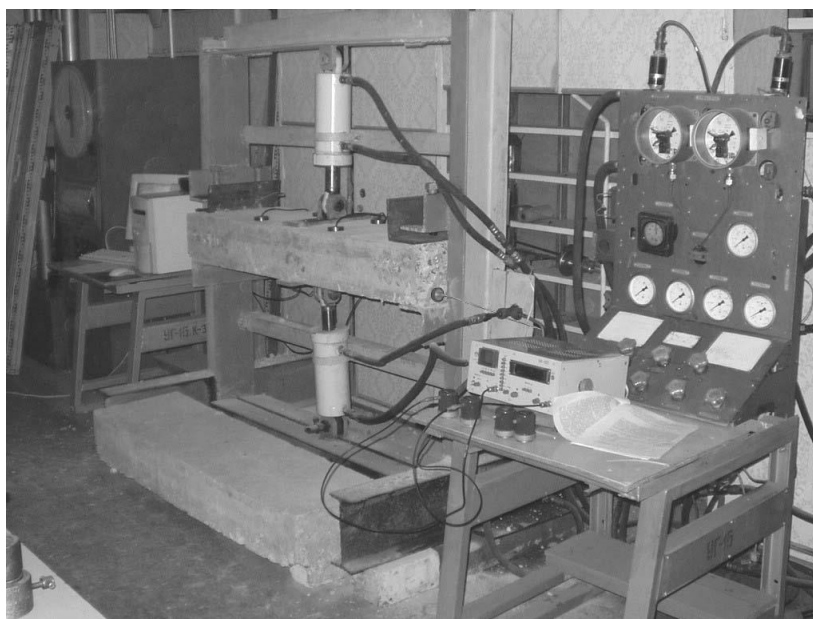
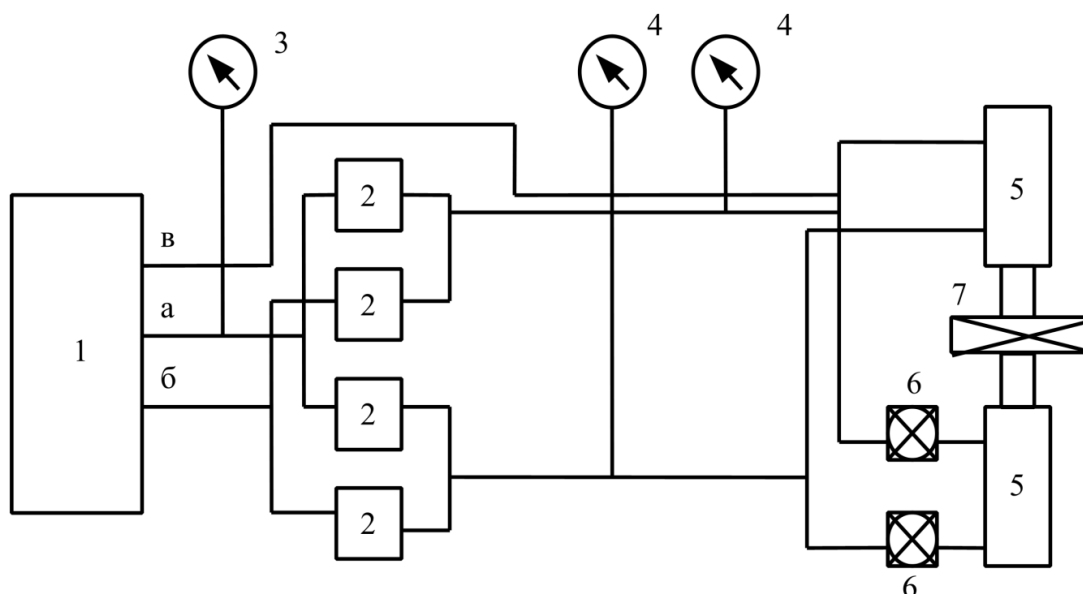


Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки (фото авторов)

Figure 2. Experimental setup general view (photo by the authors)



1 — гидравлическая система прессы: а — подача давления; б — слив; в — силоизмеритель;
2 — электромагнитный кран; 3 — манометр; 4 — электроконтактный манометр; 5 — гидравлический
цилиндр; 6 — перекрывающий кран; 7 — испытуемый образец

1 — a hydraulic system of the press: a — pressure supply; b — drain; c — force meter; 2 — electromagnetic
valve; 3 — manometer; 4 — electro contact pressure gauge; 5 — hydraulic cylinder; 6 — shutoff valve;
7 — test sample

Рисунок 3. Принципиальная схема экспериментальной установки (рисунок авторов)

Figure 3. Experimental setup layout diagram (drawing by the authors)

Для исследования напряженного состояния железобетонных элементов была разработана методика проведения измерений и изготовлен измерительный комплекс для определения:

- величины нагрузки;
- прогиба образца;
- напряжений в бетоне;
- момента образования трещин;
- положения трещины в теле образца;
- удлинения арматуры.

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

- силоизмеритель прессы МС-1000;
- датчик вертикальных перемещений образца;
- индикатор часового типа для измерения прогиба с ценой деления 0,01 мм;
- тензометрическая станция для определения величины напряжений в бетоне;
- прибор акустической эмиссии для определения момента образования трещин в напряженном бетоне;
- ультразвуковой прибор для определения основных параметров бетона (скорость ультразвука, коэффициент поглощения) и положения трещины в напряженном бетоне;
- блок измерения удлинения в арматуре.

Для измерения деформаций и напряжений бетона конструкции применялся электротензометрический метод, в основе которого лежит тензорезисторный эффект, проявляющийся в изменении электрического активного сопротивления проводника при его деформации. В электротензометрический измерительный комплекс входили: тензодатчики с базой 50 мм; усилитель тензометрический УТ4-1.

При проведении исследований использованы проволоочные тензорезисторы с одноэлементной петлевой решеткой на бумажной основе марки ПКБ.

Схема расположения тензодатчиков представлена на рисунке 4.

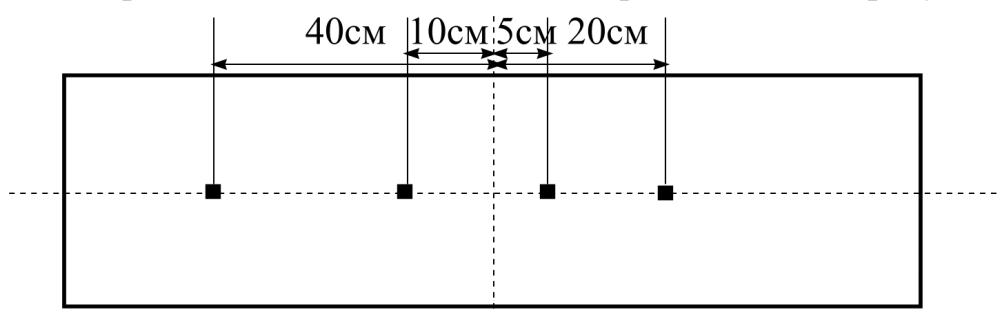


Рисунок 4. Схема расположения тензодатчиков (рисунок авторов)

Figure 4. Strain gauges arrangement diagram (drawing by the authors)

Удлинение арматуры определяется ультразвуковым способом — фазовым методом. В основу данного метода положен принцип изменения фазы сигнала от удлинения исследуемого материала:

$$\Delta \ell = \frac{\Delta \varphi \cdot c}{f \cdot 2\pi}, \quad (1)$$

где $\Delta \varphi$ — изменение фазы сигнала в градусах; c — скорость прохождения ультразвука в арматуре, м/с; f — частота сигнала, Гц.

Синусоидальный сигнал частотой 15 МГц, вырабатываемый генератором 1, подается на модулятор 2 и схему формирования импульсов 3 (рис. 5). Схема формирования импульсов вырабатывает прямоугольные импульсы, синхронизированные по фронту синусоидального сигнала, которые поступают на модулятор. С модулятора, усиленный усилителем 4 сигнал, подается на пьезоизлучатель 5.

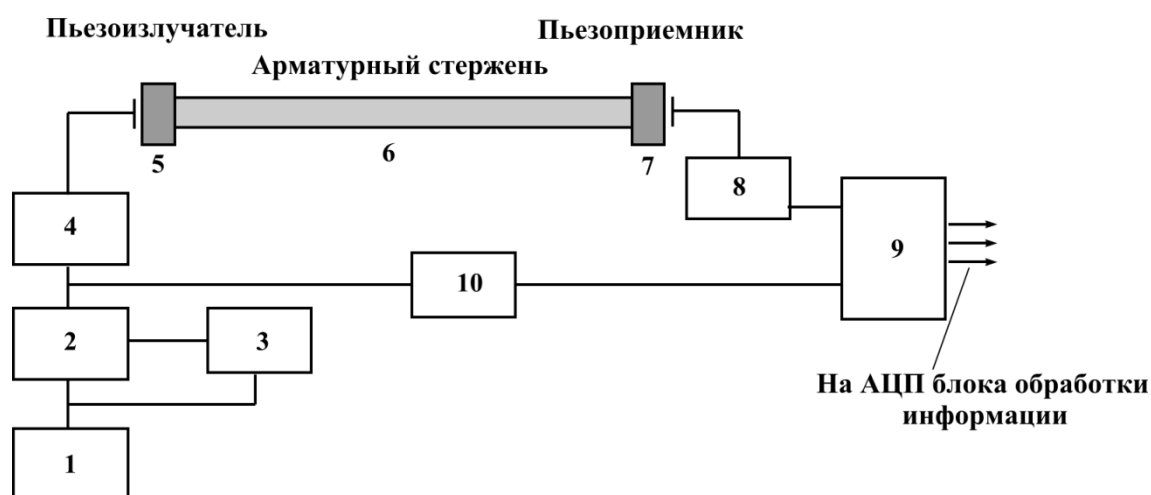


Рисунок 5. Схема определения удлинения арматурного стержня ультразвуковым способом фазовым методом (рисунок авторов)

Figure 5. Scheme for determining the reinforcing bar elongation by the ultrasonic method by the phase method (drawing by the authors)

Акустические сигналы, сформированные пьезоизлучателем с помощью переходника подаются в арматуру. Сигнал, прошедший по всей длине арматуры и задержанный на время t , преобразуемый в электрические импульсы пьезоприемником 7, усиливаемые предусилителем 8, поступает на фазометр 9. На этот фазометр также подается сигнал с аттенюатора 10. Контроль амплитуд на каждом из входов фазометра, обеспечивается микровольтметром переменного тока. С выхода фазометра сигнал подается на измерительный комплекс на базе ПЭВМ. Отсчеты производятся совместно с измерениями параметров акустической эмиссии и характеристиками нагружений.

Для определения напряжения в стержневой арматуре была получена формула (2), в основе которой лежит зависимость удлинения арматуры (изменения фазы ультразвукового сигнала) от ширины раскрытия трещин.

$$\sigma_{арм} = \frac{a_{crc} \cdot E_{арм} \cdot \sigma_{бет}}{\Delta l \cdot E_{бет}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{арм}$ — напряжение в арматуре; a_{crc} — ширина раскрытия трещины; $E_{арм}$ — модуль упругости арматурной стали ($E_{арм} = 210000$ МПа); $\sigma_{бет}$ — напряжение в бетоне перед моментом образования трещин; Δl — удлинение арматуры непосредственно перед моментом образования трещины; $E_{бет}$ — модуль упругости бетона ($E_{бет} = 32400$ МПа).

В связи с большим количеством поступающей информации в единицу времени и сложностью задания параметров нагружения, имеется блок аналого-цифрового преобразования (АЦП), необходимый для преобразования аналоговых сигналов в цифровой вид. Для управления элементами автоматики установки, в комплект входит устройство дискретного ввода-вывода (УВВ).

На АЦП поступают сигналы:

- от тензометрической станции, измеряющей деформации железобетонных элементов;
- сигнал, пропорциональный удлинению арматуры с ультразвукового прибора измерения удлинения арматуры;
- сигнал с прибора, регистрирующего акустические импульсы.

На устройство ввода ПЭВМ поступают логические сигналы от датчика вертикальных перемещений образца и от датчика числа нагружений (рис. 6).

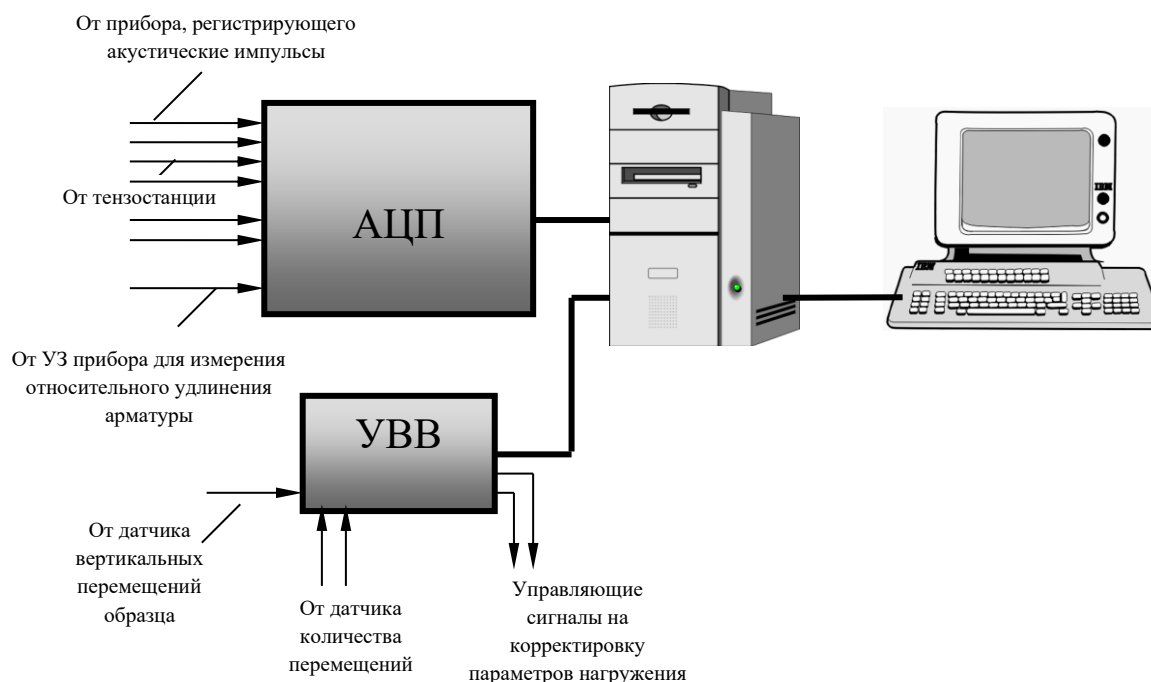


Рисунок 6. Схема блока сбора и обработки информации (рисунок авторов)

Figure 6. Data collecting and processing unit scheme (drawing by the authors)

Полученные данные обрабатывались с помощью прикладной программы (рис. 7). Результаты сохраняются в памяти ПЭВМ и выдаются управляющие сигналы на корректировку параметров нагружения.

Определение местоположения дислокационных изменений, вызванных большими величинами напряжений в материале железобетона, а также их спектрального состава, необходимого для идентификации акустических сигналов от различных источников помех осуществляется с помощью прибора акустической эмиссии (рис. 8–10).

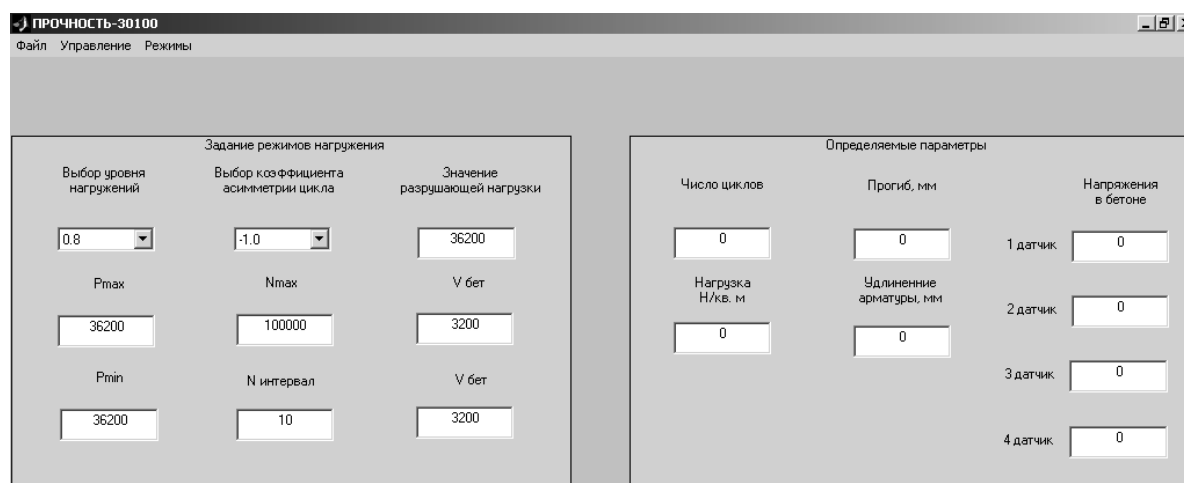


Рисунок 7. Окно управляющей программы (рисунок авторов)

Figure 7. Window of the control program (drawing by the authors)

Он 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 блока сбора и обработки информации. Для обеспечения обработки высокочастотных спектральных составляющих сигнала, дискретизация производится на частоте:

$$F_{aцп} = N_k \times n_e \times f_{max}, \quad (3)$$

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

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

Расположение пьезодатчиков представлено на рисунках 9 и 10.

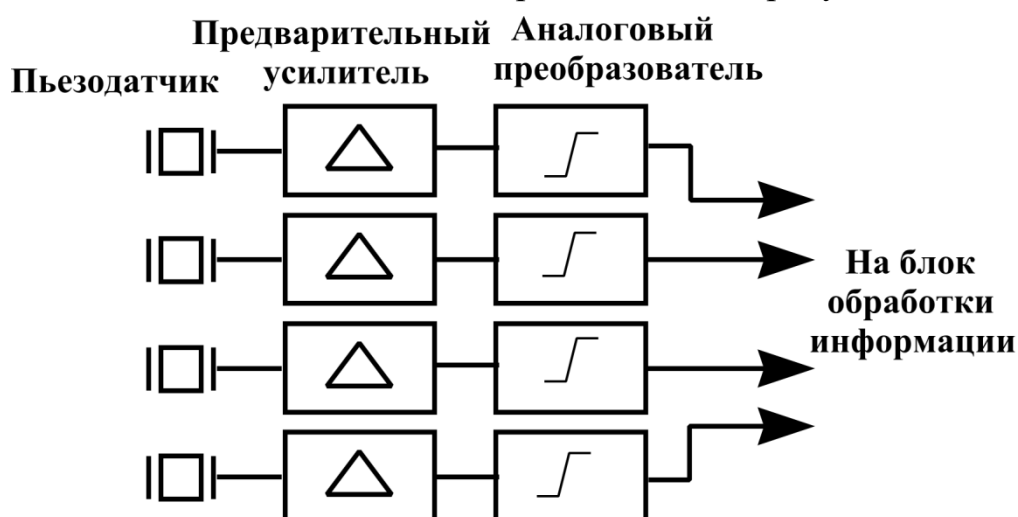


Рисунок 8. Схема прибора акустической эмиссии (рисунок авторов)

Figure 8. Acoustic emission device scheme (drawing by the authors)

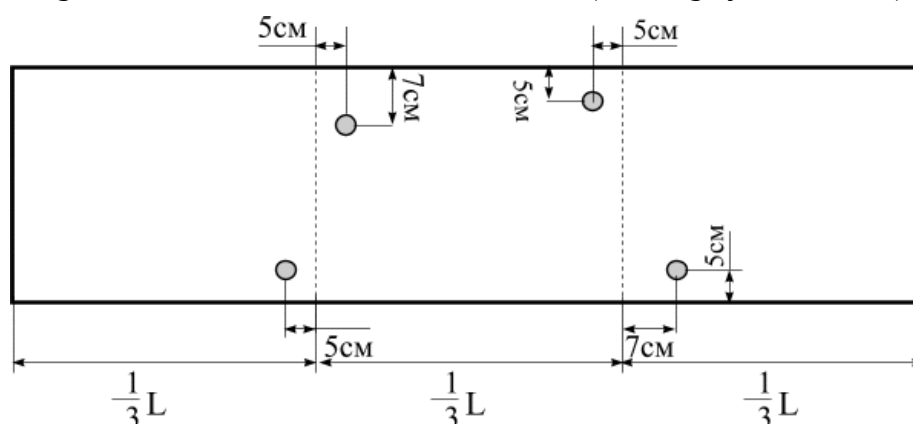


Рисунок 9. Схема расположения датчиков акустической эмиссии (рисунок авторов)

Figure 9. Acoustic emission sensors arrangement diagram (drawing by the authors)

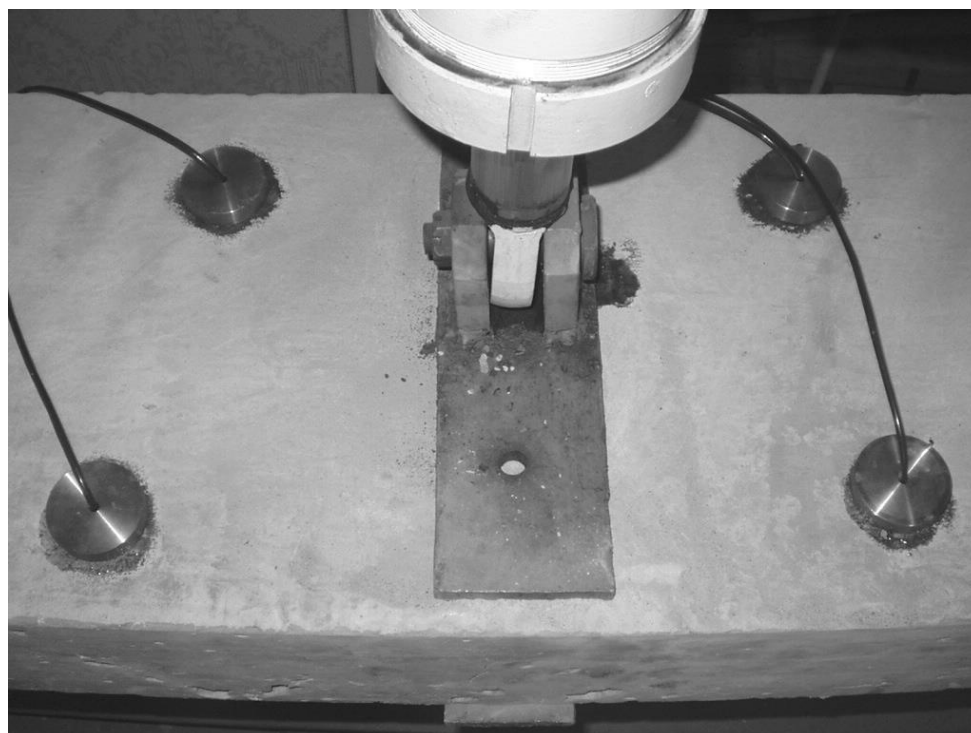


Рисунок 10. Расположение датчиков акустической эмиссии (фото авторов)

Figure 10. Acoustic emission sensors location (photo by the authors)

Преобразованные аналого-цифровые сигналы поступают на ПЭВМ и, обработанные программой, отображаются на мониторе, указывая наиболее вероятные места образования микрповреждений.

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.

При статических испытаниях железобетонных балок определялись напряжения в бетоне растянутой зоны до образования трещин, напряжения в арматуре, 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 нагрузки при усталостных испытаниях.

Критерием исчерпания прочности железобетонных образцов являлось появление текучести в арматуре. Момент начала текучести арматуры определялся по резкому приросту деформаций.

Прочность железобетона на растяжение при изгибе согласно требованиям⁴ определяли путем испытания образцов в возрасте трех месяцев. Образцы в процессе испытаний нагружали с постоянной скоростью нарастания напряжений ($0,05 \pm 0,02$) МПа/с. На каждой ступени производились замеры ширины раскрытия трещин и фиксировалась нагрузка.

Для определения напряженно-деформированного состояния железобетонных балок при статической нагрузке были испытаны четыре балки.

Результаты исследования

Research results

Появление первой волосяной трещины балки А-I было выявлено при помощи акустико-эмиссионного датчика, который определил приблизительное местоположение трещины. При визуальном осмотре была обнаружена трещина в нижней зоне балки. Непосредственно перед образованием трещины, напряжение в бетоне составляло 3,9 МПа. Так как до образования трещин бетон и арматура образца работают совместно, принято допущение, что деформации бетона и арматуры равны. Данной величине напряжения в бетоне соответствует напряжение в стержневой арматуре равное 25,5 МПа. Проанализировав данные с акустико-эмиссионных датчиков и ультразвуковые измерения, была вычислена приблизительная глубина проникновения трещины, равная 3 см с шириной раскрытия 0,04 мм. При этом прибор для измерения удлинения арматуры показал изменение фазы сигнала равное 13° (рис. 11). Значение нагрузки на момент образования первой трещины составляло 23100 Н ($57,75 \text{ Т/м}^2$) (рис. 11). При этом, напряжение в арматуре растянутой зоны составило 34 МПа (рис. 14). Перед образованием трещины, акустико-эмиссионным прибором была отмечена серия всплесков, причем их интенсивность возрастала. Как выяснилось в постиспытательном анализе полученных данных, в этот момент в спектре сигналов появились спектральные составляющие, близкие по составу к «первому звуку», который был впервые отмечен при нагрузке равной 0,48 ($11200 \text{ Н} / 28 \text{ Т/м}^2$) (рис. 16) от величины трещинообразования бетона. При этом прогиб составил 0,09 мм (рис. 15). Напряжение в бетоне растянутой зоны с правой стороны от центральной трещины составляло 1,96 МПа, слева — 1,7 МПа. При достижении значения нагрузки 29160 Н ($72,9 \text{ Т/м}^2$), трещина начала

⁴ ГОСТ 10180-90. Методы определения прочности по контрольным образцам: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного строительного комитета СССР от 29.12.89 № 168. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 45 с.

стремительно расти. При этом напряжение в арматуре возросло от 39 МПа до 265 МПа (рис. 14). Напряжения в бетоне растянутой зоны при этом составляли 3,35 МПа — справа от центральной трещины и 3,15 МПа — слева от центральной трещины. При последующем увеличении высоты трещины до 14 см обнаружилось замедление роста трещины. Ширина ее раскрытия составила 0,33 мм, прогиб балки — 1,9 мм (рис. 15). При величине нагрузки 19800 Н ($49,5 \text{ Т/м}^2$) прибор акустической эмиссии отметил появление новой серии всплесков, что свидетельствовало о формировании новой области деструктивных изменений в теле бетона (рис. 16). Триангуляция показала области будущего формирования трещин. При последующем увеличении нагрузки до 29400 Н ($73,5 \text{ Т/м}^2$), образовалась вторая трещина на расстоянии 15 см справа от центральной трещины, в месте концентрации напряжений (рис. 12). Напряжение в арматуре в месте возникновения первой трещины перед моментом образования второй трещины составляло 270 МПа. Напряжение в растянутом бетоне слева от центральной трещины равнялось 2,1 МПа. При достижении высоты второй (правой) трещины 3 см, напряжение в арматуре в месте образования первой трещины — 270 МПа, в месте образования правой трещины — 77 МПа. При анализе спектрограмм с прибора акустической эмиссии выявлено изменение спектрального состава в сторону низких частот и уменьшение скорости роста трещины. Напряжение в растянутой зоне бетона слева от центральной трещины составляло 3,2 МПа. В одной из зон концентрации напряжений, обнаруженной ранее на расстоянии 16 см от центральной трещины с левой стороны, образовалась третья трещина, при этом наблюдалось скачкообразное увеличение длины арматуры. Значение нагрузки при этом составляло 30520 Н. Напряжение в арматуре в центре составляло 285 МПа, справа — 128 МПа. При достижении нагрузки уровня 31000 Н ($77,5 \text{ Т/м}^2$) третья трещина выросла до 5 см, напряжение в арматуре в области образования первой трещины — 290 МПа, в растянутой арматуре в месте образования правой трещины — 135 МПа, в месте образования левой — 65 МПа. При увеличении нагрузки до 33360 Н ($84,15 \text{ Т/м}^2$), правая трещина увеличивается до 7,5 см, напряжение в арматуре в месте расположения центральной трещины составляло 290 МПа, напряжение в арматуре в окрестности правой трещины — 166 МПа, левой — 97 МПа (рис. 14). При дальнейшем увеличении нагрузки наблюдались нехарактерные для увеличения высоты трещины сигналы акустической эмиссии вокруг третьей трещины. При визуальном осмотре, вокруг левой трещины наблюдалось образование большого количества волосяных трещин с шириной раскрытия до 0,02 мм. При этом значение нагрузки достигло 36900 Н ($92,25 \text{ Т/м}^2$), в арматуре был достигнут предел текучести, напряжение при этом составляло 298 МПа (рис. 14), определяемый по резкому приросту удлинения. Вторая трещина,

расположенная справа от центральной, возросла, вокруг правой и левой трещин сформировались новые волосяные трещины. Прогиб балки составил 3,8 мм (рис. 15).

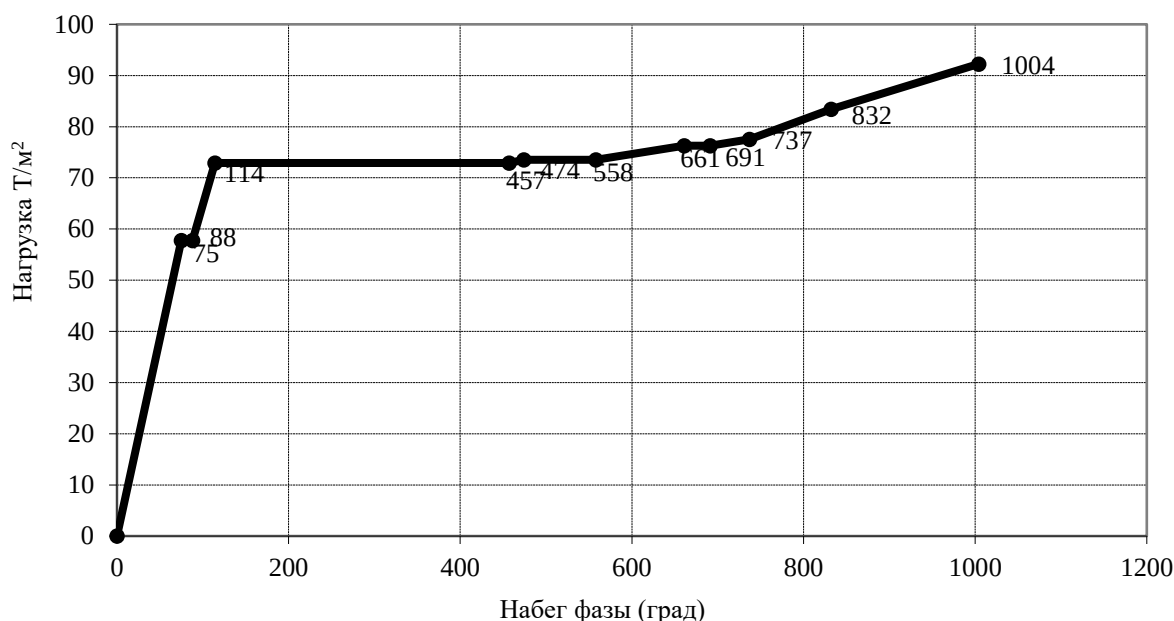


Рисунок 11. Зависимость суммарного набег фазы сигнала от нагрузки (балка 1) (рисунок авторов)

Figure 11. Dependence of the total signal phase incursion on the load (beam 1) (drawing by the authors)

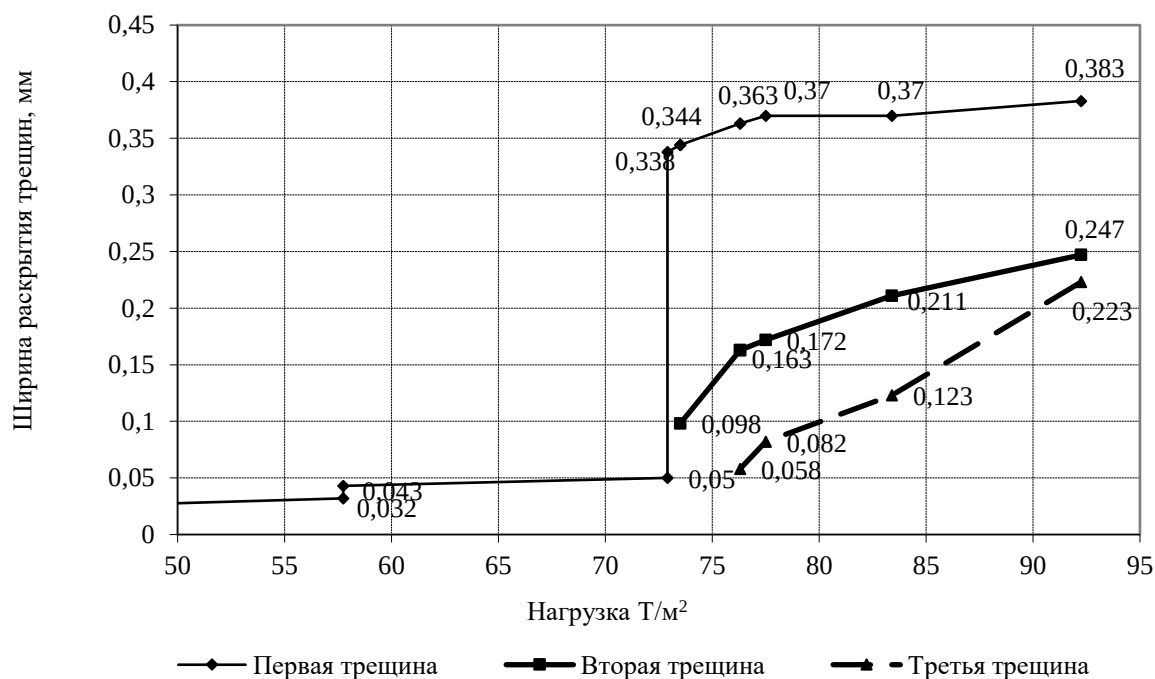


Рисунок 12. Ширина раскрытия трещин в зависимости от нагрузки (балка 1) (рисунок авторов)

Figure 12. Crack opening width depending on the load (beam 1) (drawing by the authors)

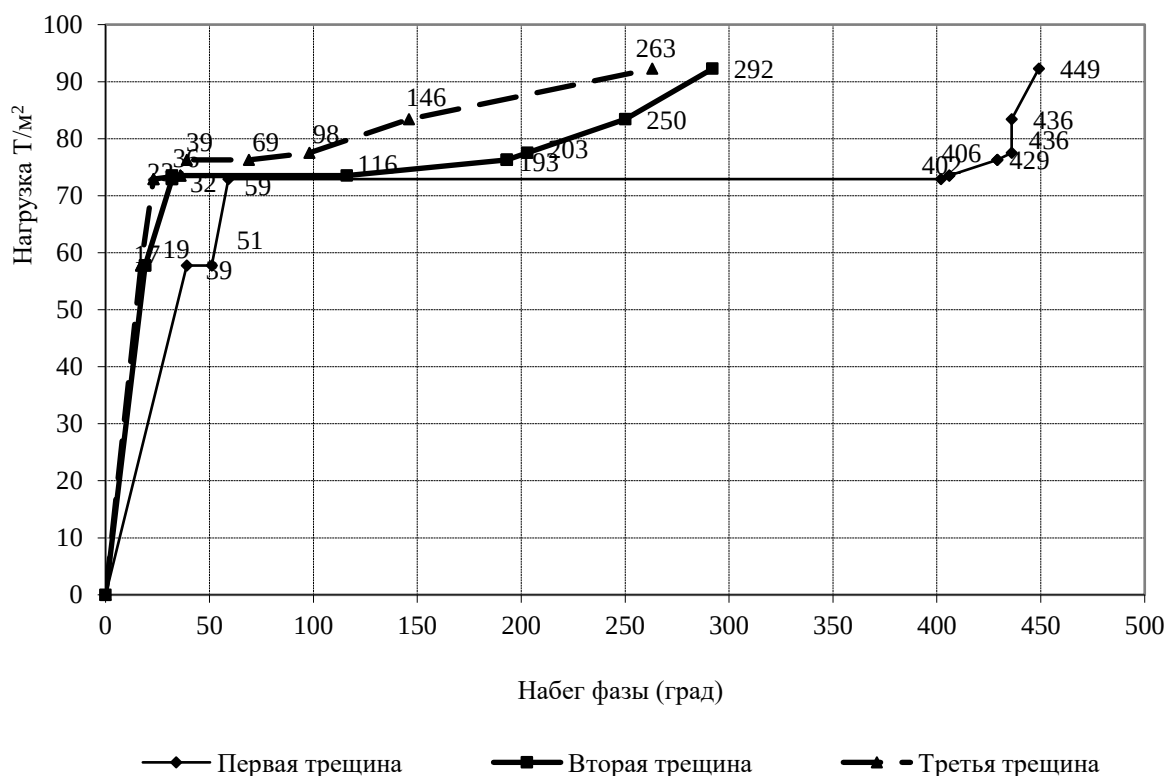


Рисунок 13. Изменение фазы сигнала
в зависимости от удлинения арматуры (балка 1) (рисунок авторов)

Figure 13. Change in the signal phase depending
on the reinforcement elongation (beam 1) (drawing by the authors)

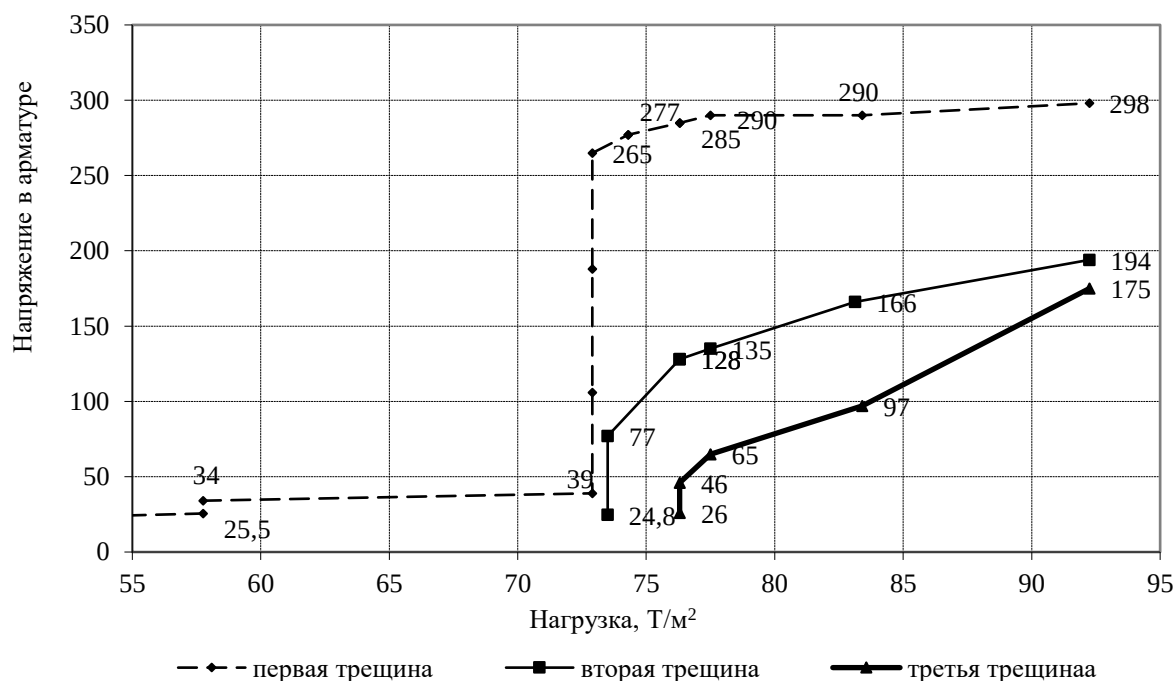


Рисунок 14. Напряжение в арматуре (балка 1) (рисунок авторов)

Figure 14. Stress in reinforcement (beam 1) (authors' drawing)

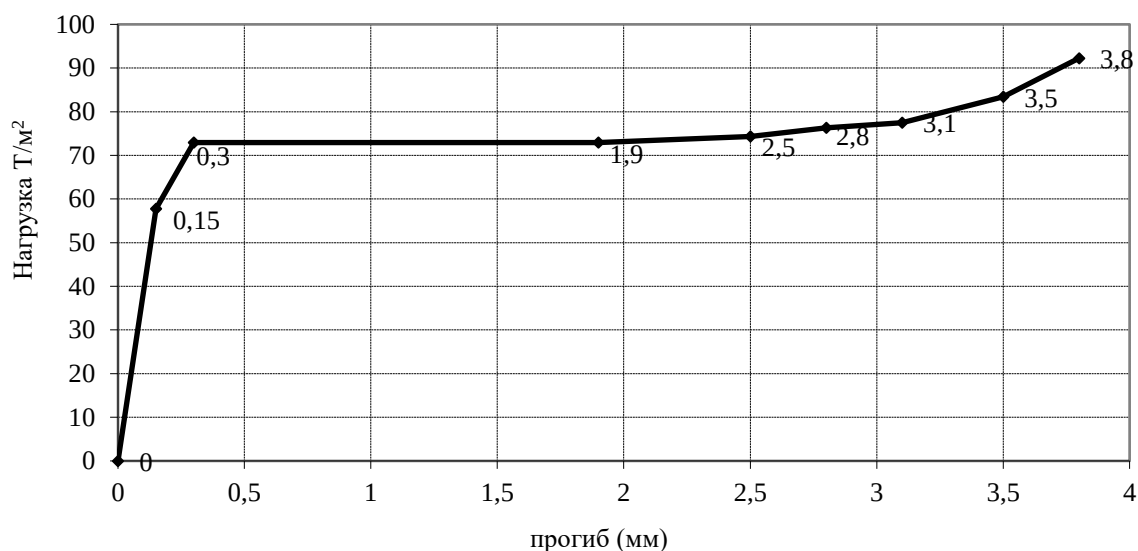


Рисунок 15. Прогибы образца в зависимости от нагрузки (балка 1) (рисунок авторов)

Figure 15. Sample deflections depending on the load (beam 1) (authors' drawing)

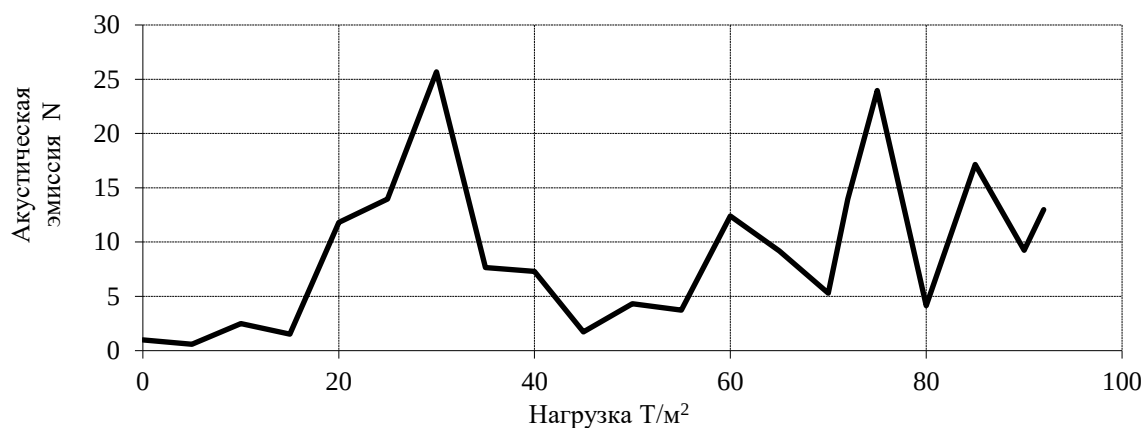


Рисунок 16. Зависимость акустического спектра от нагрузки (балка 1) (рисунок авторов)

Figure 16. The dependence of the acoustic spectrum on the load (beam 1) (drawing by the authors)

В ходе статических испытаний было испытано 4 образца. Анализ результатов статических испытаний показывает, что появление первых волосяных трещин с шириной раскрытия $0,03 \div 0,04$ мм наблюдается при нагрузке $19640 \div 23100$ Н.

Непосредственно перед образованием трещин напряжения в арматуре не превышали 28 МПа.

При дальнейшем увеличении нагрузки отмечалось появление новых трещин.

Разрушение балок происходило при нагрузке от 28550 до 37700 Н, вследствие текучести арматуры, что соответствовало напряжениям в арматуре $294 \div 310$ МПа.

В соответствии с требованиями ⁵, статическая прочность железобетонных образцов определялась как среднее арифметическое значение по трем наибольшим по прочности образцам.

Значение разрушающей нагрузки составляло 36200 Н.

Коэффициент вариации по разрушающей нагрузке составил 10,3 %.

Необходимо отметить, что при данной нагрузке разрушение (дробление) сжатой зоны бетона не наблюдалось.

Испытания образцов на выносливость состояли в нагружении их силами, периодически изменяющимися от максимального до минимального значений. Нагружение железобетонных балок осуществлялось по схеме трехточечного изгиба (рис. 17).

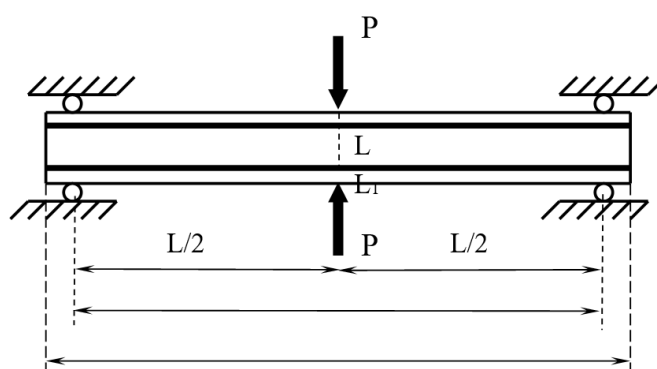


Рисунок 17. Схема трехточечного изгиба (рисунок авторов)

Figure 17. Three-point bend scheme (drawing by the authors)

Циклические испытания образцов проводились с различными уровнями нагружений, коэффициент асимметрии цикла напряжений принимал значения -1; -0,5; 0; 0,5.

Результаты усталостных испытаний железобетонных образцов представлены в таблице 1.

В результате расчетов получены уравнения регрессии, определяющие зависимость σ_{max}/R_{pu} - $\lg N$ при различных характеристиках цикла нагружения (табл. 2). Всего на выносливость было испытано 36 образцов.

По корреляционным уравнениям определены коэффициенты выносливости на базе 10^6 циклов.

⁵ ГОСТ 10180-90. Методы определения прочности по контрольным образцам: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного строительного комитета СССР от 29.12.89 № 168. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 45 с.

Таблица 1 / Table 1

Результаты усталостных испытаний
Endurance test results

№ серии Series No.	№ подсерии Subseries number	№ испытания Test No.	Средняя расчетная прочность образцов, Рст, Н Average computed strength of samples, Pst, N	Уровень нагружения, σ/Рст Loading level σ/Pst	Коэффициент асимметрии цикла, ρ Cycle asymmetry coefficient ρ	Нагрузка Load		Количество циклов, N Number of cycles N
						min. P, Н	max. P, Н	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	36200	0,6	0,5	10860	21720	1000000→
		2	36200	0,7	0,5	12670	25340	1000000→
	3	1	36200	0,8	0,5	14480	28960	1000000→
		2	36200	0,8	0,5	14480	28960	385315
		3	36200	0,8	0,5	14480	28960	356570
	4	1	36200	0,9	0,5	16290	32580	276990
		2	36200	0,9	0,5	16290	32580	9240
		3	36200	0,9	0,5	16290	32580	11075
	1	1	36200	0,6	0	0	21720	9685
		2	36200	0,6	0	0	21720	468630
		3	36200	0,6	0	0	21720	502460
	2	1	36200	0,7	0	0	25340	384810
		2	36200	0,7	0	0	25340	42280
		3	36200	0,7	0	0	25340	40740
2	1	1	36200	0,8	0	0	28960	34500
		2	36200	0,8	0	0	28960	3870
		3	36200	0,8	0	0	28960	3780
	2	1	36200	0,6	-0,5	-10860	21720	2950
		2	36200	0,6	-0,5	-10860	21720	59880
		3	36200	0,6	-0,5	-10860	21720	68660
	3	1	36200	0,7	-0,5	-12670	25340	76440
		2	36200	0,7	-0,5	-12670	25340	9458
		3	36200	0,7	-0,5	-12670	25340	12120
	4	1	36200	0,8	-0,5	-14480	28960	6625
		2	36200	0,8	-0,5	-14480	28960	1320
		3	36200	0,8	-0,5	-14480	28960	890
3	1	1	36200	0,6	-1	-21720	21720	650
		2	36200	0,6	-1	-21720	21720	14737
		3	36200	0,6	-1	-21720	21720	22200
	2	1	36200	0,7	-1	-25340	25340	15850
		2	36200	0,7	-1	-25340	25340	1450
		3	36200	0,7	-1	-25340	25340	1146
	3	1	36200	0,8	-1	-28960	28960	1740
		2	36200	0,8	-1	-28960	28960	112
		3	36200	0,8	-1	-28960	28960	178
	4	1	36200	0,6	-1	-21720	21720	158
		2	36200	0,6	-1	-21720	21720	14737
		3	36200	0,6	-1	-21720	21720	22200

Составлено авторами / Compiled by the authors

Таблица 2 / Table 2

Уравнения регрессии

Regression equations

Коэффициент асимметрии цикла Cycle asymmetry coefficient	Уравнение The equation	Коэффициент выносливости Endurance coefficient
$\rho = 0,5$	$\sigma/R_{pu} = 1,16 - 0,065 \cdot \lg N$	0,77
$\rho = 0$	$\sigma/R_{pu} = 1,13 - 0,095 \cdot \lg N$	0,56
$\rho = -0,5$	$\sigma/R_{pu} = 1,10 - 0,105 \cdot \lg N$	0,47
$\rho = -1$	$\sigma/R_{pu} = 1,00 - 0,095 \cdot \lg N$	0,43

Составлено авторами / Compiled by the authors

Обсуждение

Discussion

Анализ корреляционных уравнений позволяет сделать следующие выводы, что при возрастании коэффициента асимметрии цикла ρ от -1 до 0,5 коэффициент выносливости испытываемых образцов увеличивается от 0,43 до 0,77.

Нагружение конструкций циклической нагрузкой, когда изменяется не только величина, но и знак нагрузки ($\rho < 0$ — знакопеременные циклы), значительно опаснее знакопостоянных циклов с точки зрения интенсивности снижения их несущей способности.

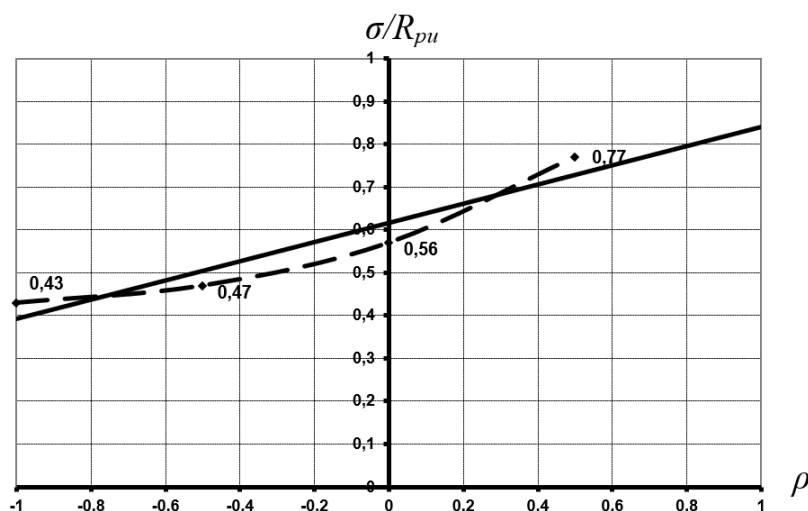


Рисунок 18. Зависимость предела выносливости от коэффициента асимметрии цикла нагружения (рисунок авторов)

Figure 18. Dependence of the endurance limit on the asymmetry coefficient of the loading cycle (drawing by the authors)

При определении выносливости железобетонных образцов при условии, что $\rho = 0$ (частный случай), необходим учет напряжений, величина которых больше 56 % от величины разрушающей нагрузки.

Графически результаты исследований выносливости железобетона при различных ρ можно представить зависимостью $\sigma_{\max} / R_{pu} - \rho$ (рис. 18).

На основании экспериментальных данных по линейной зависимости определена выносливость железобетона при $\rho = 1$ (т. е. при длительном нагружении), которая составляет $0,84 R_{пр}$. Величина полученной длительной прочности железобетона сопоставима с результатами исследований других авторов [15; 16].

Корреляционное уравнение имеет вид:

$$\frac{\sigma}{R_{pu}} = 0,616 + 0,224 \cdot \rho, \quad (4)$$

Таким образом, в ходе исследований были получены следующие результаты:

1. Разработана методика проведения измерений и определения НДС железобетонных образцов.
2. Проведены статические испытания и определена статическая прочность железобетонных образцов.
3. Исследована зависимость усталостной прочности от режима нагружения (уровня нагружения и коэффициента асимметрии цикла).
4. Анализ результатов экспериментальных исследований подтверждает необходимость дополнительно учитывать выносливость железобетона при расчетах конструкций, работающих в режиме циклического воздействия нагрузок, в том числе и аэродромных покрытий.
5. На основе результатов исследований необходимо разработать практические рекомендации по учету параметров воздействий многоколесных опор ВС при оценке режимов эксплуатации железобетонных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татаренков, А.И. Исследование усиленных статически неопределимых железобетонных балочных конструкций / А.И. Татаренков // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 18 ноября 2021 года / Курский государственный университет Курск: ЗАО "Университетская книга", 2021. — С. 195–199. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47478177&pff=1> (дата обращения: 21.07.2022).

2. **Рубцов, О.И.** Результаты мониторинга при статических испытаниях усиленных железобетонных балок / О.И. Рубцов. — DOI <https://doi.org/10.25714/MNT.2019.39.010> // Мониторинг. Наука и технологии. — 2019 — № 1. — С. 70–77. — URL: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2019-1-10> (дата обращения: 21.07.2022).
3. **Сабуренкова, В.А.** Исследование расчетных нагрузок на аэродромные покрытия / В.А. Сабуренкова, Я.Н. Цаплин // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2021. — № 2. — С. 10–12. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561333> (дата обращения: 21.07.2022).
4. **Saleh, Z.** Damage assessment of GFRP bar reinforced ultra-high-strength concrete beams under overloading impact conditions / Z. Saleh, M.N. Sheikh, A. Remennikov, A. Basu. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110581> // Engineering Structures. — 2020. — Т 213. — С. 110581. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029619333000> (дата обращения: 21.07.2022).
5. **Kim, W.** Shear strength of reinforced concrete beams using recycled coarse aggregates without stirrups / W. Kim, T.H.K. Kang, D. Lee, H. Choi, Y.K. Kwak. — DOI <https://doi.org/10.14359/51728079> // ACI Structural Journal. — 2020. — Т 117. — № 6. — С. 281–295. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45014545> (дата обращения: 21.07.2022).
6. **Lee, D.H.** Shear strength of reinforced concrete beams strengthened in shear using externally-bonded FRP composites / D.H. Lee, S.J. Han, K.S. Kim, J.M. LaFave. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.025> // Composite Structures. — 2017. — Т 173. — С. 177–187. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822316319778> (дата обращения: 21.07.2022).
7. **Frolov, N.V.** Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences / N.V. Frolov, G.A. Smolyago. — DOI <https://doi.org/10.34910/MCE.103.3> // Magazine of Civil Engineering. — 2021. — Т 103. — № 3. — С. 10303. — URL: https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2021_103.03/ (дата обращения: 21.07.2022).
8. **Карнюхин, В.А.** Анализ дефектов при содержании аэродромных покрытий / В.А. Карнюхин, А.Ф. Зубков // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой 40-летию юбилею Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ, Тамбов, 22–25 мая 2019 года / Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2019. — С. 197–200. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?pff=1&id=41026995> (дата обращения: 21.07.2022).
9. **Суладзе, М.Д.** Эксплуатационно-техническое состояние жестких аэродромных покрытий. Часть 1. жесткие аэродромные покрытия / М.Д. Суладзе, В.К. Федулов. — DOI <https://doi.org/10.36535/0235-5000-2022-06-5> // Проблемы безопасности полетов. — 2022. — № 6. — С. 57–65. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48808873> (дата обращения: 04.08.2022).
10. **Суладзе, М.Д.** Эксплуатационно-техническое состояние жестких аэродромных покрытий. Часть 2. классификация дефектов аэродромных покрытий / М.Д. Суладзе, В.К. Федулов. — DOI <https://doi.org/10.36535/0235-5000-2022-07-1> // Проблемы безопасности полетов. — 2022. — № 7. — С. 3–33. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49240161> (дата обращения: 04.08.2022).
11. **Суладзе, М.Д.** Основы управления эксплуатационно-техническим состоянием аэродромных покрытий / М.Д. Суладзе, В.К. Федулов, В.Г. Подопргора // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2020. — № 4. — С. 64–71. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44503459> (дата обращения: 04.08.2022).
12. **Стахно, Р.Е.** Анализ технического состояния и повреждений аэродромных покрытий / Р.Е. Стахно, Н.В. Коробов // E-Scio. — 2020. — № 11. — С. 169–174. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44452330> (дата обращения: 04.08.2022).
13. **Степушин, А.П.** Натурные испытания цементобетонного покрытия / А.П. Степушин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2016 — № 4. — С. 98–102. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27467396> (дата обращения: 04.08.2022).
14. **Wesołowski, M.** Evaluation of the Cement Concrete Airfield Pavement's Technical Condition Based on the APCI Index / M. Wesołowski, P. Iwanowski. — DOI <https://doi.org/10.24425/ace.2020.135219> // Archives of Civil Engineering. — 2020. — Т 66. — № 4. — С. 237–248. — URL: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/135219/edition/118208/content> (дата обращения: 04.08.2022).

15. **Кулагин, А.В.** О некоторых особенностях планирования и статистической обработки результатов усталостных испытаний образцов / А.В. Кулагин // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 3. — С. 4. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38513082> (дата обращения: 04.08.2022).
16. **Белых, А.Г.** Исследование статической и усталостной прочности цементобетона при различных режимах нагружения с использованием метода акустической эмиссии / А.Г. Белых, А.Н. Скляров, Л.А. Кукарских // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2016. — № 3. — С. 47–53. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25581570> (дата обращения: 04.08.2022).

Сведения об авторах:

Скляров Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия, e-mail: sknini@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-9872>

Вартазарова Анастасия Эдуардовна — кандидат экономических наук, преподаватель, ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия, e-mail: an_vartazarova@mail.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=936298

Мартынов Антон Константинович — курсант, ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия, e-mail: takota775@lenta.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0256-8073>

Статья получена: 04.10.2022. Принята к публикации: 25.12.2022. Опубликовано онлайн: 08.01.2023.

REFERENCES

1. Tatarenkov A.I. [Study of reinforced statically indeterminate reinforced concrete beam structures]. In: Kursk State University. [Security of the building stock in Russia. Problems and Solutions: Materials of the International Academic Readings, Kursk, November 18, 2021]. Kursk: Universitetskaya kniga; 2021. p. 195–199. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47478177&pff=1> (accessed 21st July 2022). (In Russ.).
2. Rubtsov O.I. Monitoring the Static Tests of Reinforced Concrete Beams. *Monitoring. Science and Technologies*. 2019; (1): 70–77. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2019.39.010>.
3. Saburenkova V.A., Tsaplin Y.N. Aerodrome Pavement Design Load Research. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2021; (2): 10–12. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561333> (accessed 21st July 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Saleh Z., Sheikh M.N., Remennikov A., Basu A. Damage assessment of GFRP bar reinforced ultra-high-strength concrete beams under overloading impact conditions. *Engineering Structures*. 2020; 213: 110581. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110581>.
5. Kim W., Kang T.H.K., Lee D., Choi H., Kwak Y.K. Shear strength of reinforced concrete beams using recycled coarse aggregates without stirrups. *ACI Structural Journal*. 2020; 117(6): 281–295. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14359/51728079>.
6. Lee D.H., Han S.J., Kim K.S., LaFave J.M. Shear strength of reinforced concrete beams strengthened in shear using externally-bonded FRP composites. *Composite Structures*. 2017; 173: 177–187. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.025>.
7. Frolov, N.V., Smolyago, G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 103(3): 10303. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34910/MCE.103.3>.
8. Karnyukhin V.A., Zubkov A.F. [Analysis of defects in the maintenance of airfield pavements]. In: [Sustainable development of the region: architecture, construction, transport: Materials of the 6th International Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the Institute of Architecture, Construction and Transport, TSTU, Tambov, May 22–25, 2019]. Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V.; 2019. p. 197–200. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?pff=1&id=41026995> (accessed 21st July 2022). (In Russ.).
9. Suladze M.D., Fedulov V.K. Operational Technical Condition of Rigid Airfield Coverings. Part 1. Rigid Airfield Pavements. *Problemy bezopasnosti poletov*. 2022; (6): 57–65. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.36535/0235-5000-2022-06-5>.
10. Suladze M.D., Fedulov V.K. Operational Technical Condition of Rigid Airfield Coverings. Part 2. Classification of Airfield Pavement Defects. *Problemy bezopasnosti poletov*. 2022; (7): 3–33. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.36535/0235-5000-2022-07-1>.
11. Suladze M.D., Fedulov V.K., Podoprigora V.G. Bases of Management of Operational and Technical Condition of Airfields Pavements. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2020; (4): 64–71. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44503459> (accessed 4th August 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Stakhno R.E., Korobov N.V. [Analysis of the technical condition and damage of airfield pavements]. *E-Scio*. 2020; (11): 169–174. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44452330> (accessed 4th August 2022). (In Russ.).
13. Stepushin A.P. Field Tests of Concrete Pavement. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2016; (4): 98–102. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27467396> (accessed 4th August 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Wesolowski M., Iwanowski P. Evaluation of the Cement Concrete Airfield Pavement's Technical Condition Based on the APCI Index. *Archives of Civil Engineering*. 2020; 66(4): 237–248. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24425/ace.2020.135219>.
15. Kulagin A.V. About Some Features of Planning and Statistical Processing of Results of Fatigue Tests of Samples. *Engineering Journal of Don*. 2019; (3): 4. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38513082> (accessed 4th August 2022). (In Russ., abstract in Eng.).

16. Belikh A.G., Sklyarov A.H., Kukarskikh L.A. Research Static and Fatigue Strength of Concrete Under Loading Condition with Usage Acoustic Emission Method. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*. 2016; (3): 47–53. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25581570> (accessed 4th August 2022). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Alexander N. Sklyarov — Military Educational and Scientific Centre of the «Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia, e-mail: sknini@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-9872>

Anastasiya Eh. Vartazarova — Military Educational and Scientific Centre of the «Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia, e-mail: an_vartazarova@mail.ru
РИИЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=936298

Anton K. Martynov — Military Educational and Scientific Centre of the «Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia, e-mail: takota775@lenta.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0256-8073>

Submitted: 4th October 2020. Revised: 25th December 2020. Published online: 8th January 2020.