



Научно-технический журнал
Издаётся с 2003 года.
Выходит шесть раз в год.

№4 (36) 2011
(июль-август)

СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Редакционный совет:

Голенков В.А. д.т.н., проф., председатель
Радченко С.Ю. д.т.н., проф.,
зам. председателя
Борзенков М.И. к.т.н., доц., секретарь
Астафичев П.А. д.ю.н., проф.
Иванова Т.Н. д.т.н., проф.
Киричек А.В. д.т.н., проф.
Колчунов В.И. д.т.н., проф.
Константинов И.С. д.т.н., проф.
Новиков А.Н. д.т.н., проф.
Попова Л.В. д.э.н., проф.
Степанов Ю.С. д.т.н., проф.

Главный редактор:

Колчунов В.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.

Заместители главного редактора:

Гончаров Ю.И. д.т.н., проф.
Колесникова Т.Н. д. арх., проф.
Коробко В.И. д.т.н., проф.

Редколлегия:

Бондаренко В.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Гордон В.А. д.т.н., проф.
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Клюева Н.В. д.т.н., доц.
Коробко А.В. д.т.н., проф.
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.
Меркулов С.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.
Ольков Я.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Римшин В.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.
Сергейчук О.В. д.т.н., проф.
Серпик И.Н. д.т.н., проф.
Тур В.В. д.т.н., проф.
Турков А.В. д.т.н., проф.
Федоров В.С. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.
Чернышов Е.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.
Шах Р. д.т.н., проф.

Ответственные за выпуск:

Данилевич Д.В. к.т.н., доц.
Солопов С.В. к.т.н.

Адрес редакции:

302006, Россия, г. Орел,
ул. Московская, 77.
Тел.: +7 (4862) 73-43-49;
www.gu-unpk.ru
E-mail: oantc@ostu.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
по надзору в сфере связи и массовых ком-
муникаций. Свидетельство:
ПИ № ФС77-35718 от 24 марта 2009 г.

Подписной индекс **86294** по объединенному
каталогу «Пресса России»

© ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011

Содержание

Теория инженерных сооружений.

Строительные конструкции

- Гвозков А.П., Калашников М.О., Калашникова О.В.** Определение количества нагелей в составных деревянных балках вибрационным методом с использованием коэффициента нелинейных искажений..... 3
- Деркач В.Н., Орлович Р.Б.** О применении стержневых моделей в расчетах каменного заполнения каркасных зданий..... 9
- Казakov Д.В.** Некоторые результаты экспериментального исследования процессов трещинообразования в составных железобетонных элементах..... 15
- Коробко В.И., Актуганов А.А.** Определение максимального прогиба прямоугольных пластинок на упругом основании с комбинированными граничными условиями..... 21
- Купчикова Н.В.** Деформационный расчет свай, усиленных цементацией грунта под ее нижним концом при вертикальном и горизонтальном нагружении..... 28
- Троицкая С.Е.** Приоритет использования «активной» пористости при прогнозе осадки слабых грунтов в основаниях транспортных сооружений..... 33
- Турков А.В., Марфин К.В.** Прогнозы и частоты собственных колебаний составных квадратных изотропных пластин с различными граничными условиями при изменении жесткости связей сдвига..... 38

Строительные материалы и технологии

- Ладаев Н.М., Гюмджян П.П.** О вероятности разрушения хрупкого материала ударом..... 43
- Огуцов В.А., Горохова Е.Р., Макарова В.М., Медведева П.А.** Вибрационный грохот как многопродуктовый классификатор: кинетика извлечения фракций..... 47
- Романов В.П., Гюмджян П.П., Богородский А.В., Ветюгов А.В.** Повышение эффективности процесса тонкого измельчения корундовых материалов..... 51
- Соломенцев А.Б., Баранов И.А.** Влияние стабилизирующих добавок ЦМА на свойства вязкого дорожного битума..... 55
- Христофоров А.И., Христофорова И.А., Пикалов Е.С., Кутровская С.В.** Влияние структуры керамики на прочностные характеристики керамического кирпича. 62
- Черников С.А., Горячев М.Г.** Исследование особенностей ударной вязкости герметизирующих материалов для оценки их работоспособности в швах монолитных цементобетонных покрытий..... 68

Журнал «Строительство и реконструкция» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук.



Scientific and technical journal
The journal is published since 2003.
The journal is published 6 times a year.

№4 (36) 2011
(July-August)

BUILDING AND RECONSTRUCTION

The founder – federal state educational institution of the higher vocational training
«State University – Educational-Science-Production Complex»
(State University ESPC)

Editorial council:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president

Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president

Borzenkov M.I. Candidat Sc. Tech.,
Assistant Prof.

Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.

Ivanova T.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Popova L.V. Doc. Ec. Tech., Prof.

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief

Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief assistants:

Goncharov Y.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kolesnikova T.N. Doc. Arc., Prof.

Korobko V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial committee

Bondarenko V.M. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Karpenko N.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kljueva N.V. Doc. Sc. Tech., Assistant Prof.

Korobko A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Korol E.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Merkulov C.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Olkov Y.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Rimshin V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Sergeyev O.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Serpik I.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Tur V.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Turkov A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Fyodorov V.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Chernyshov E.M. Doc. Sc. Tech., Prof.

Schach R. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition:

Danilevich D.V. Candidat Sc. Tech.,
Assistant Prof.

Solopov S.V. Candidat Sc. Tech.

The edition address: 302006, Orel,
Street Moscow, 77
+7 (4862) 73-43-49
www.gu-unpk.ru
E-mail: oante@ostu.ru

Journal is registered in Federal service on su-
pervision in sphere of communication and
mass communications

The certificate of registration:
ПИИ № ФС77-35718 from 24.03.09

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»
86294

© State University ESPC, 2011

Contents

Theory of engineering structures.

Building units

Gvozdev P.A., Kalashnikov M.O., Kalashnikova O.V. Determine the number of dowel pins in composite wood beams by vibration method using the new nonlinear harmonic distortion coefficient (NHD).....	3
Derkatch V.N., Orlovich R.B. About application of rod models inculcations of the stone fillings of framework buildings.....	9
Kazakov D.V. Some results of experimental studies of the processes of composite cracking in reinforced concrete elements.....	15
Korobko V.I., Aktuganov A.A. Definition of the maximal deflection rectangular plates on the elastic basis with combined boundary conditions.....	21
Kupchikova N.V. Deformation calculation of the piles strengthened by cementation of the ground under its bottom end at vertical and horizontal loading.....	28
Troitskaja S.E. Priority of using the “active” porosity for forecasting the settlement of weaksoils in foundations of engineering structures.....	33
Turkov A.V., Marfin K.V. Deflection and natural frequency composites square isotropic plates with various boundary conditions for change stiffness shear.....	38

Construction materials and technologies

Ladaev N.M., Guyumdzhyan P.P. About probability of destruction of the fragile material impact.....	43
Ogurtsov V.A., Gorokhova E.R., Makarova V.M., Medvedeva P.A. Vibrating roar as the multigrocery qualifier: kinetika extraction of fractions.....	47
Romanov V.P., Guyumdzhyan P.P., Bogorodskiy A.V., Vetyugov A.V. Increase of efficiency of process of thin crushing corundum of materials.....	51
Solomentsev A.B., Baranov I.A. Influence of stabilizing additives for RMA on properties of viscous road bitumen.....	55
Khristoforov A.I., Khristoforova I.A., Pikalov E.S., Kutrovskaya S.V. Influence of the structure of ceramics for strength characteristics of ceramic brick.....	62
Chernikov S.A., Goryachev M.G. The research of impact strength features of sealing materials for the estimation of their operability in monolithic concrete layer seams.....	68

Journal is included into the List of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition
the academic degrees

УДК 24.072.2

ГВОЗКОВ П.А., КАЛАШНИКОВ М.О., КАЛАШНИКОВА О.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА НАГЕЛЕЙ В СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛКАХ ВИБРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

В статье предлагается способ определения количества нагелей в составных деревянных балках с помощью вибрационного метода и с использованием коэффициента нелинейных искажений – динамического параметра, известного из радиоэлектроники. Как показали результаты проведенных экспериментов, при постепенном увеличении количества нагелей в деревянной балке составного сечения происходит асимптотическое приближение графика к горизонтальной, соответствующей значению коэффициента нелинейных искажений для балки цельного поперечного сечения.

Ключевые слова: составные балки, нагели, вибрационный метод, коэффициент нелинейных искажений, эффективное число нагелей.

При реконструкции зданий и сооружений зачастую возникает проблема усиления конструкций под новые технологические нужды. Изгибаемые конструкции, как правило, усиливаются путем наращивания или подращивания сечений по всей длине элементов или на их определенных участках. При этом дополнительные слои выполняются из того же материала, что и усиливаемая конструкция (или из другого материала). Такие усиленные конструкции называются составными, и для них остро стоит вопрос о контроле качества в новом состоянии. Поэтому в настоящее время разработка и совершенствование неразрушающих методов диагностики и контроля качества строительных конструкций из различного материала, в том числе и составных конструкций, является актуальной научной проблемой.

В последние десятилетия в ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» интенсивно развиваются динамические методы диагностики и оценки качества строительных конструкций, в основе которых лежат вибрационные технологии. В большинстве разработанных способов динамическим критерием оценки качества конструкций является их основная (или первая резонансная) частота колебаний. Однако этот параметр является не очень чувствительным ко многим дефектам строительных конструкций особенно железобетонных. Поэтому перед исследователями рассматриваемой проблемы стоит задача поиска новых динамических критериев для диагностики состояния и оценки качества строительных конструкций как в процессе их изготовления, так и в процессе эксплуатации в существующих зданиях и сооружениях. Среди таких динамических критериев заслуживает внимания коэффициент нелинейных искажений, который хорошо известен в радиотехнике [1] и используется для оценки нелинейности электронных радиотехнических систем.

Методика использования коэффициента нелинейных искажений $K_{ни}$ для диагностики и оценки качества железобетонных конструкций изложена в патенте [2]. В предлагаемой статье этот новый для строительных систем динамический параметр используется для определения количества нагелей в составных деревянных балках.

Коэффициент нелинейных искажений является мерой искажений простых гармонических колебаний. Он представляет собой отношение эффективных значений гармонических колебаний к эффективному значению суммарного выходного сигнала и измеряется в процентах [1]:

$$K_{ни} = 100 \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} \approx \frac{100}{A_1} \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}, \quad (1)$$

где A_i – амплитуда собственных или резонансных колебаний составляющих гармоник с частотами $n f$. Приведенная в правой части (1) упрощенная формула справедлива для случаев, когда нелинейные искажения невелики ($K_{\text{ни}} \leq 10\%$).

Деревянные составные конструкции, выполненные на нагельных соединениях, за счет податливости нагелей из-за смятия древесины обладают ярко выраженными нелинейными свойствами. Поэтому следует ожидать, что для таких конструкций параметр $K_{\text{ни}}$ может служить критерием их качества. Покажем это на примере испытания большеразмерных моделей деревянных двухслойных балок.

Установка для проведения динамических и статических испытаний моделей, а также комплект и компоновка используемых устройств, приборов и средств преобразования, обработки и фиксирования информации показаны на рисунках 1 и 2.

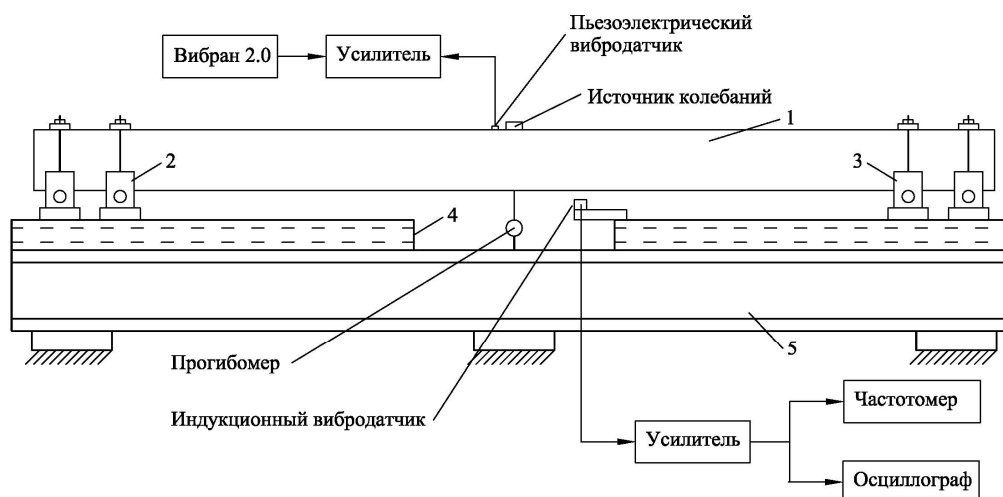


Рисунок 1 – Установка для испытаний деревянных балок: 1 – испытываемая конструкция; 2, 3 – опоры; 4 – направляющие для опор; 5 – основание



Рисунок 2 – Комплекс приборов для проведения испытаний

На верхней части в центре балки закрепляется источник виброколебаний, в качестве которого использовался электродвигатель постоянного тока с дисбалансом ротора ≈ 15 г. Скорость вращения вала двигателя регулировалась при помощи блока питания. На штативе закреплялся механический прогибомер марки ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм. К направляющим был прикреплен индукционный вибродатчик, сигнал с которого поступает на осциллограф марки С1-65А и на электронный частотомер марки ЧЗ-63/1. Осциллографом контролируется момент наступления резонанса по максимальной амплитуде входного сигнала, а численное значение основного тона колебаний фиксируется частотомером. Для контроля полученных результатов частота колебаний балки измерялась также при помощи пьезоэлектрического датчика марки КД-32 в комплекте с перьевым самописцем марки НЗ38-2П, прикрепленного на верхней части балки.

При проведении экспериментов испытываемые конструкции закреплялись на установке, представленной на рисунке 1. Концы конструкций закреплялись жестко. Фотография жесткого закрепления концов балок представлена на рисунке 3.

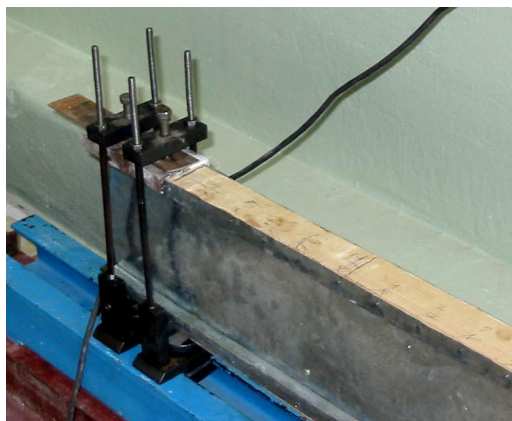


Рисунок 3 – Узел жесткого опирания балок

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе на установке размещалась балка цельного сечения (эталон). В ней возбуждались вынужденные колебания на резонансной частоте; наступление резонанса контролировалось с помощью электронного осциллографа, а с помощью виброанализатора «Вибран 2.0» определялись амплитуды первых 4-х гармоник. Затем по формуле 1 подсчитывался коэффициент нелинейных искажений $K_{ни}$. Результаты испытаний, проведенных с деревянной балкой цельного сечения с размерами $2800 \times 100 \times 50$ мм, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний деревянной балки цельного сечения

Частота (f), Гц		Амплитуда (A), мм		$K_{ни}$, %
f_1	36,8	A_1	0,357	1,73
f_2	73,6	A_2	0,005	
f_3	110,4	A_3	0,003	
f_4	147,2	A_4	0,002	

После испытаний балки цельного сечения на стенде закреплялась деревянная балка составного сечения с размерами $2800 \times 100 \times 50$ мм, которая по высоте состояла из двух слоев по 50 мм. Вначале слои балки соединялись одним нагелем посередине и далее, как для эталонной балки, проводилась процедура возбуждения вынужденных колебаний на резонансной частоте, измерение этой частоты, определение первых четырех гармоник и вычисление коэффициента нелинейных искажений.

Затем устанавливались два новых нагеля в четвертях пролета балки и процедура определения $K_{ни}$ повторялась. Такая последовательность выполнения эксперимента выполнялась при 5, 9 и 11 нагелях. Схема и порядок установки нагелей приведена на рисунке 4. Результаты измерений, полученные при проведении экспериментов, и коэффициенты нелинейных искажений, подсчитанные расчетным путем, приведены в таблице 2.

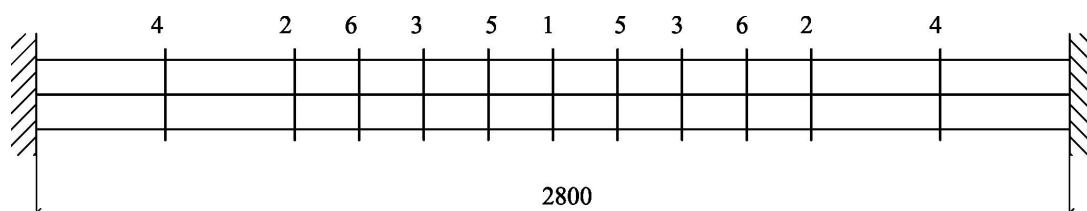


Рисунок 4 – Схема расположения и порядок установки нагелей

Таблица 2 – Результаты испытаний деревянной балки составного сечения

Количество нагелей, шт.	Частота (f), Гц		Амплитуда (A), мм		$K_{ни}$, %
1	f_1	22,2	A_1	0,498	6,95
	f_2	44,4	A_2	0,033	
	f_3	66,6	A_3	0,01	
	f_4	88,8	A_4	0,004	
3	f_1	22,8	A_1	0,453	6,77
	f_2	45,6	A_2	0,029	
	f_3	68,4	A_3	0,010	
	f_4	91,2	A_4	0,002	
5	f_1	23,0	A_1	0,404	5,19
	f_2	46,1	A_2	0,02	
	f_3	69,1	A_3	0,006	
	f_4	92,1	A_4	0,002	
7	f_1	23,6	A_1	0,356	4,39
	f_2	47,2	A_2	0,015	
	f_3	70,8	A_3	0,004	
	f_4	94,4	A_4	0,002	
9	f_1	24,1	A_1	0,312	3,68
	f_2	48,2	A_2	0,011	
	f_3	72,3	A_3	0,003	
	f_4	96,4	A_4	0,0015	
11	f_1	24,7	A_1	0,256	3,26
	f_2	49,4	A_2	0,008	
	f_3	74,1	A_3	0,0022	
	f_4	98,8	A_4	0,001	

По результатам этих экспериментов на рисунке 5 построен график зависимости коэффициента нелинейных искажений от количества нагелей. Как видно из рисунка, при постепенном увеличении количества нагелей в деревянной балке составного сечения происходит асимптотическое приближение графика к горизонтали ($K_{ни} = 1,73$), соответствующей значению коэффициента нелинейных искажений для балки цельного поперечного сечения, принятой за эталонную конструкцию. Участок кривой с абсциссами 1-3 можно не рассматривать, поскольку при одном нагеле не обеспечивается совместная работа слоев составной балки.

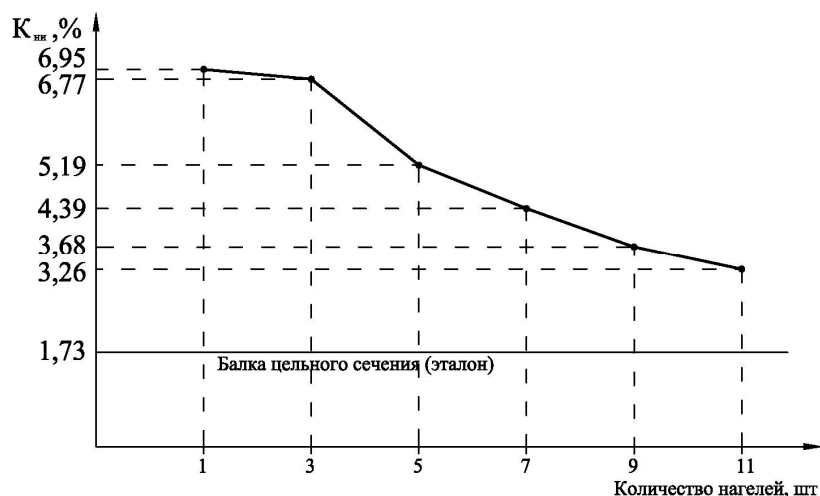


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента нелинейных искажений от количества нагелей

Кривую, изображенную на рисунке 5, можно аппроксимировать функцией:

$$K_{\text{ни}} = \sqrt{143,193/n - 1,918}.$$

Из этой формулы можно найти число нагелей в зависимости от $K_{\text{ни}}$:

$$n = \sqrt{\frac{143,193}{K_{\text{ни}}^2 + 1,918}}. \quad (2)$$

Поскольку нагели, находящиеся в разных местах балки, работают в различных условиях в зависимости от поперечной силы, приходящейся на сечение, в котором расположен тот или иной нагель, а также в зависимости от качества выполненного соединения, то, используя формулу (2), следует говорить об «эффективном» числе нагелей, представляющим собой некоторое усредненное количество нагелей, отвечающих вычисленному на основе эксперимента коэффициенту нелинейных искажений. Таким образом, зная значение коэффициента нелинейных искажений, можно определить «эффективное» число нагелей в конструкции конкретного типа. Этот параметр («эффективное» число нагелей) можно использовать в виде критерия для оценки качества составных конструкций.

Выводы

1 Для диагностики состояния и контроля качества составных деревянных конструкций предложен новый динамический параметр – коэффициент нелинейных искажений, который широко используется в радиотехнике для анализа нелинейности электронных радиотехнических систем.

2 Разработан способ оценки податливости нагельных соединений в составных деревянных балках по параметру – «эффективному» количеству нагелей», который определяется опытным путем для конкретного типа балок с помощью коэффициента нелинейных искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкритек, П. Справочное руководство по звуковой схематехнике: Пер. с немецкого [Текст] / П. Шкритек. – М.: Мир, 1991. – С. 30-42.
2. Коробко, В.И. Оценка качества железобетонных конструкций балочного типа вибрационным методом с использованием коэффициента нелинейных искажений [Текст] / В.И. Коробко, Г.В. Слюсарев, М.О. Калашников, О.В. Бояркина // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 11. – С. 14-17.

Гвозков Павел Александрович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура»
Тел.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail: center_epb@mail.ru

Калашников Михаил Олегович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail: center_epb@mail.ru

Калашникова Ольга Владимировна

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Студентка магистратуры
Тел.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail: center_epb@mail.ru

GVOZKOV P.A., KALASHNIKOV M.O., KALASHNIKOVA O.V.

DETERMINE THE NUMBER OF DOWEL PINS IN COMPOSITE WOOD BEAMS BY VIBRATION METHOD USING THE NEW NONLINEAR HARMONIC DISTORTION COEFFICIENT (NHD)

The article proposes the way to determine the number of dowel pins in composite wood beams by means of vibration method and nonlinear harmonic distortion coefficient (NHD) – the dynamic parameter, known in radio electronics. According to the results of the fulfilled tests the diagram asymptotic approximation to horizontal that corresponds to nonlinear harmonic distortion coefficient for monolithic cross section beam takes place at gradual increase of dowel pins number in the wood beam of cross section.

Keywords: composite wood beams, dowel pins, vibration method, nonlinear harmonic distortion coefficient (NHD), effective number of dowel pins.

BIBLIOGRAPHY

1. Shkritek, P. Spravochnoe rukovodstvo po zvukovoj shemotehnike: Per. s nemeckogo [Tekst] / P. Shkritek. – M.: Mir, 1991. – S. 30-42.
2. Korobko, V.I. Ocenka kachestva zhelezobetonnyh konstrukcij balochnogo tipa vibracionnym metodom s ispol'zovaniem koeficienta nelinejnyh iskazhenij [Tekst] / V.I. Korobko, G.V. Sljusarev, M.O. Kalashnikov, O.V. Bojarina // Kontrol'. Diagnostika. – 2007. – №11. – S. 14-17.

Gvozkov Paul Aleksandrovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, senior lecturer of department «Architecture»
Ph.: +7 (4862) 73-43-95

Kalashnikov Michael Olegovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel
Post-graduate student of department «Building designs and materials»
Ph.: +7 (4862) 73-43-95

Kalashnikova Olga Vladimirovna

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel
Student of a magistracy
Ph.: +7 (4862) 73-43-95

ДЕРКАЧ В.Н., ОРЛОВИЧ Р.Б.

О ПРИМЕНЕНИИ СТЕРЖНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ В РАСЧЕТАХ КАМЕННОГО ЗАПОЛНЕНИЯ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ

Рассмотрены подходы к расчету каменных стен каркасных зданий с применением каркасно-стержневой модели. Показаны особенности использования каркасно-стержневой модели при расчете каменных кладок, методики оценки прочности выделенной в направлении действия главных сжимающих напряжений полосы каменной кладки. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению прочности образцов кирпичной кладки на сжатие и растяжение под углом к горизонтальным растворным швам и армированных кирпичных балок-стенки. Экспериментальные и численные исследования работы каменной кладки подтверждают возможность использования каркасно-стержневых аналогий при расчете каменных конструкций.

Ключевые слова: сжатая полоса, каменная кладка, анизотропные свойства.

В последнее время актуальным является монолитно-кирпичное домостроение, в котором несущую функцию выполняет монолитный железобетонный каркас, а роль перегородок и стенового ограждения – каменное заполнение. Последнее, как показывает практика, является весьма чувствительным к трещинообразованию, особенно при наличии оконных и дверных проемов [1]. Это связано с прогибами междуэтажных перекрытий и деформациями каркаса от горизонтальных воздействий и неравномерных осадок фундаментов. Немаловажную роль в образовании трещин играют температурные и усадочные деформации, особенно при изготовлении заполнения из газосиликатных и пенобетонных камней. Самонесущие стены, связанные с каркасом и работающие на поперечный изгиб, а также заполнения, работающие на перекося в плоскости стен, должны рассчитываться по образованию и раскрытию трещин, а также по деформациям, то есть по предельным состояниям второй группы. Однако полноценные указания по методике таких расчетов как в отечественных [2], так и зарубежных [3] нормах отсутствуют.

Как выход из положения в практике используются приближенные методы, основанные на балочной аналогии и расчете наклонных сечений. Такие модели, однако, не приемлемы для стен с оконными и дверными проемами, которые являются концентраторами напряжений. Альтернативой им могут быть аналоговые каркасно-стержневые модели, которые применительно к железобетонным конструкциям давно используются за рубежом. Например, в США этот метод под названием STMC (от английского strut and tie method) рекомендован в нормах [4]. В отечественной практике метод интенсивно развивается российскими учеными Барановой Т.И. и Соколовым Б.С., которыми, в частности, разработаны практические рекомендации по расчету железобетонных стен с технологическими отверстиями [5, 6].

Сущность метода заключается в выделении из конструкции сжатых полос бетона и растянутой арматуры в направлении действия главных напряжений. Векторное поле направлений их траекторий определяется аналитическими либо численными методами. Усилия в полосах, объединенных в каркас, определяются методами строительной механики. Предполагается, что разрушение выделенных наклонных полос бетона может происходить в результате их сжатия, а растянутых – в результате исчерпания прочности арматуры.

Применение каркасно-стержневых моделей к расчету каменных стен имеет свои особенности и ограничения, связанные с механизмами разрушения кладки, ее ярко выраженными анизотропными свойствами, отсутствием армирования как в железобетоне и другими факторами. В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, а в каменном стеновом заполнении каркасов зданий возможны следующие механизмы разрушения:

- растяжение перпендикулярно горизонтальным растворным швам с образованием горизонтальной трещины (1);
- сдвиг в плоскости горизонтальных растворных швов (2);

- раздробление кладки в результате ее двухосного сжатия (3);
- растяжение в направлении действия главных растягивающих напряжений с образованием кривой трещины (4).

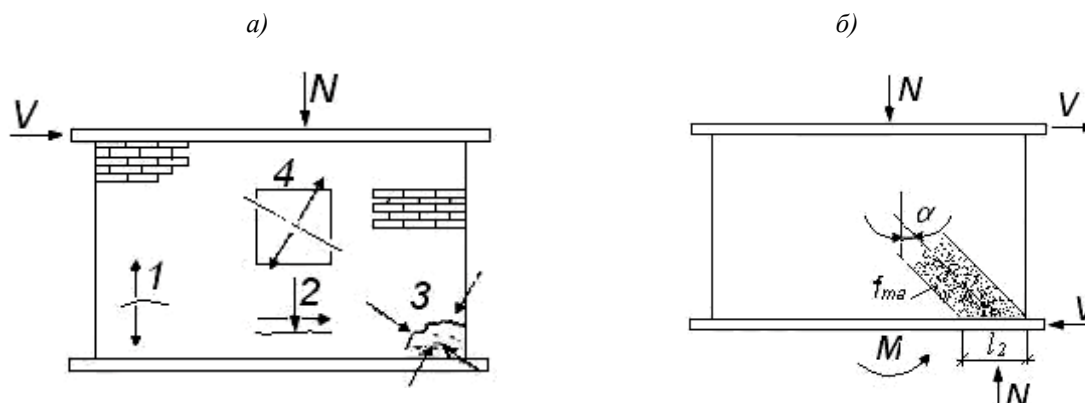


Рисунок 1 – Механизмы разрушения стенового каменного заполнения (а); стержневая модель расчета заполнения согласно норм [7] (б)

Последний механизм наиболее часто встречается в стеновом заполнении каркасов. Применение стержневой аналогии для расчета таких стен впервые получило отражение в швейцарских нормах [7]. Его сущность заключается в наклонной сжатой полосе шириной $l_2 = l - 2M / N$, прочность которой проверяется из условия сжатия (1) и сдвига (2):

$$N \leq f_{ma} l_2 d \cos^2 \alpha ; \quad (1)$$

$$V / N \leq \mu , \quad (2)$$

где l – длина стенового заполнения; f_{ma} – сопротивление кладки сжатию под углом $\alpha = \arctg(V / N)$ к горизонтальным растворным швам; μ – коэффициент внутреннего трения в горизонтальных растворных швах; d – толщина стены.

Наиболее проблематичным в таких расчетах является получение достоверной информации о сопротивлении кладки сжатию под различными углами к горизонтальным швам. Величины этих сопротивлений отсутствуют в нормативной литературе и определяются экспериментально на специальных образцах кладки. Учитывая строение последней как композита, состоящего из растворных швов и камней, следует иметь в виду возможность различных механизмов разрушения при сжатии кладки под углом α к растворным швам. Определяющими здесь являются величины сжимающих (σ_n) и касательных (τ_n) напряжений, действующих в плоскости растворных швов. Согласно экспериментальным данным [8], в начале, при увеличении напряжений σ_n сопротивление кладки сдвигу вдоль горизонтальных растворных швов возрастает (рисунок 2, а), что согласуется с критерием Кулона-Мора:

$$f_v = f_{v0} + \mu \sigma_n , \quad (3)$$

где f_{v0} – прочность кладки на сдвиг при $\sigma_n = 0$; μ – коэффициент внутреннего трения в горизонтальных растворных швах; σ_n – сжимающие напряжения, действующие перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов.

При дальнейшем возрастании σ_n сопротивление сдвигу уменьшается, и образцы разрушаются как при одноосном сжатии кладки перпендикулярно горизонтальным швам.

Прочность выделенной в направлении главных сжимающих напряжений полосы каменной кладки можно также определить из условия ее растяжения в перпендикулярном направлении от действия главных растягивающих напряжений (с механизмом разрушения 4 на рисунке 1, а). Для этого, однако, необходимы данные о прочности кладки на растяжение под углом к горизонтальным растворным швам. Такие данные в нормативной литературе также отсутствуют, а их получение экспериментальным путем сопряжено с большими технологическими трудностями.

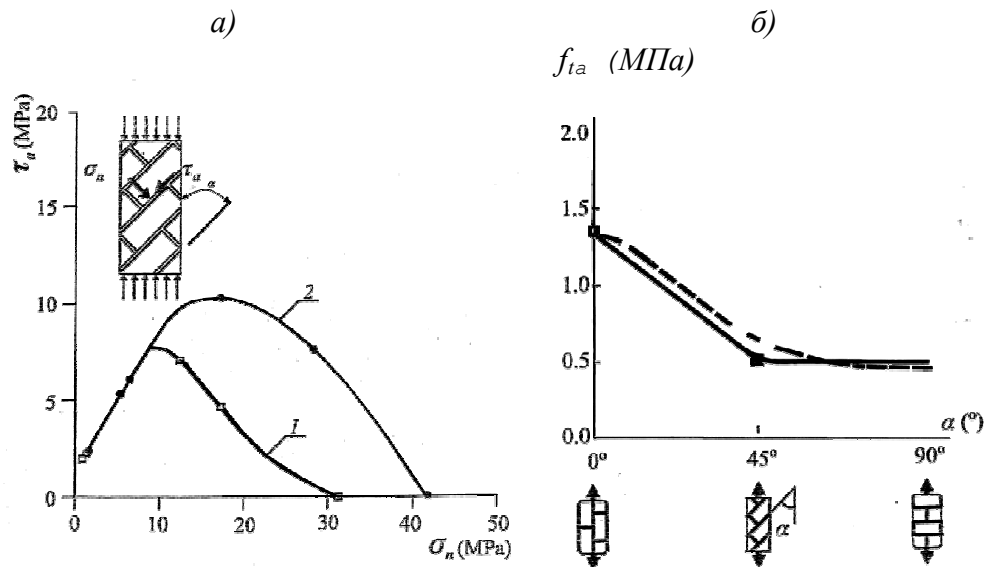


Рисунок 2 – Результаты экспериментального определения прочности образцов кирпичной кладки на сжатие (а) и растяжение (б) под углом к горизонтальным растворным швам (линия 1 соответствует прочности раствора $f_m = 5,2$ МПа, линия 2 – $f_m = 12,4$ МПа)

На рисунке 2, б показана, полученная в работе [9], экспериментальная зависимость сопротивления кирпичной кладки растяжению $f_{t\alpha}$ под углом к горизонтальным растворным швам (сплошная линия) и ее аппроксимация (штриховая линия) уравнением:

$$\frac{1}{f_{t\alpha}} = \frac{\cos^2 \alpha}{f_{t0}} + \frac{\sin^2 \alpha}{f_{t90}}, \quad (4)$$

где f_{t0} и f_{t90} – прочность кладки на растяжение, соответственно, вдоль горизонтальных растворных швов (по перевязанному сечению) и поперек швов (по перевязанному сечению).

Исследования подтвердили анизотропные свойства кладки, причем степень анизотропии $n = f_{t0}/f_{t90}$ зависит от вида каменной кладки, механических свойств камней, раствора и, что самое важное, прочности сцепления раствора с камнями. Учитывая сложность испытаний кладки на растяжение, в последнее время все шире используются квадратные образцы, испытываемые на диагональное сжатие в стандартных гидравлических прессах. Нормированная методика таких испытаний [10] позволяет получить прочность кладки на растяжение (в результате ее раскалывания по диагонали сжатия) из выражения:

$$f_t = 0,707 \frac{P}{A_n}, \quad (5)$$

где $A_n = \frac{(a+b)d}{2}$ – расчетная площадь поверхности разрушения; P – разрушающее усилие; a , b – ширина и высота образца; d – толщина образцов.

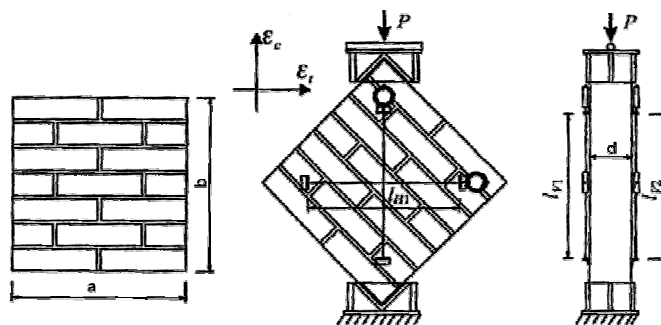


Рисунок 3 – Тест диагонального сжатия (схема испытаний)

Пригодность каркасно-стержневой аналогии была апробирована в работе [11] применительно к кирпичным балкам-стенкам, армированным в растянутой зоне заанкеренной в торцах стержневой арматурой (рисунок 4).

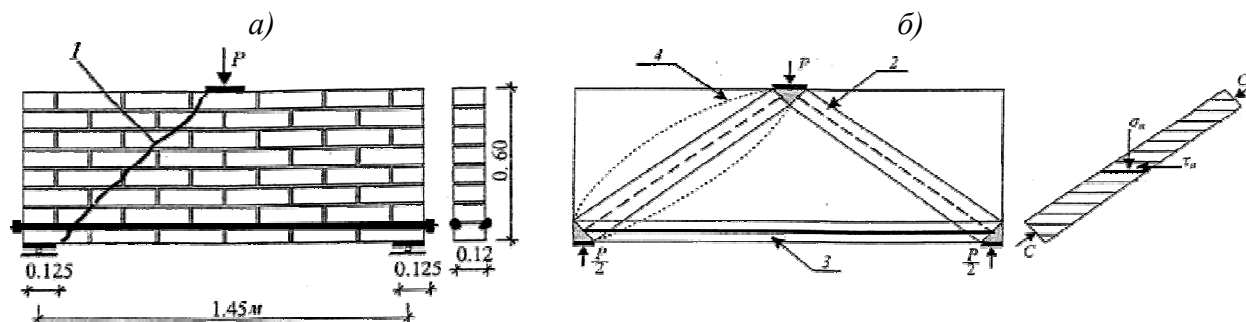


Рисунок 4 – Экспериментальные образцы армированных кирпичных балок-стенок (а); каркасно-стержневая модель кирпичных балок (б): 1 – трещина; 2 – выделенная сжатая полоса; 3 – арматура; 4 – теоретическое поле главных сжимающих напряжений

Разрушение опытных образцов от действия сосредоточенной нагрузки происходило в результате образования наклонных под углом $\alpha = 35^\circ$ трещин, которые начинали развиваться с приопорных зон. Для прочностного анализа выделенной сжатой полосы с осью симметрии, совпадающей с трещинами, были выполнены стандартные испытания по определению прочности кладки на сжатие f_c и сдвиг вдоль горизонтальных растворных швов f_{v0} с выявлением величины коэффициента μ в уравнении (3). Средние значения указанных величин оказались равными $f_c=14,3$ МПа, $f_{v0}=0,78$ МПа, $\mu=0,63$.

Из прочностного анализа выделенной полосы (рисунок 4, б) установлено, что решающее влияние на образование трещины имели скалывающие напряжения τ_n , действующие в плоскости горизонтальных растворных швов. Вычисленная разрушающая нагрузка $P=54$ кН была на 10-15% меньше полученных экспериментальных значений.

Подобные результаты были получены в работе [12] путем расчета представленных на рисунке 4, а экспериментальных образцов методом конечных элементов по программе DIANA. Последняя, кроме определения напряженно-деформированного состояния, позволяет производить критериальную оценку прочности конструкции и установить динамику развития трещин, начиная от старта последних. Расчеты выполняются в нелинейной постановке при возрастающей нагрузке и ниспадающей ее составляющей в момент полного исчерпания несущей способности конструкции (рисунок 5, б).

В основу алгоритма развития трещин положены процедуры, основанные на энергии разрушения материала при основных напряженных состояниях [12, 13]. Как видно из характера деформирования балки-стенки в момент ее разрушения определяющими при образовании косой трещины являлись сдвигающие напряжения (рисунок 4, а).

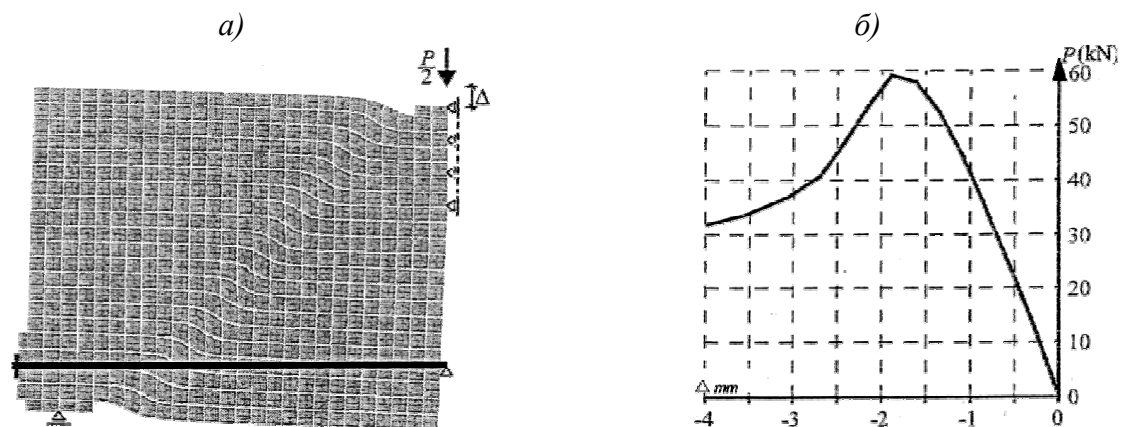


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель деформирования армированной балки-стенки (а); расчетная зависимость «P-Δ» (б)

Это подтверждает принятую выше предпосылку при определении прочности сжатой полосы (рисунок 4, б). По сравнению с каркасно-стержневыми моделями такие алгоритмы более предпочтительны для каменных стен, решающее влияние на трещинообразование в которых играет концентрация напряжений – угловые зоны оконных и дверных проемов, места передачи сосредоточенных нагрузок и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деркач, В.Н. О морфологии трещин, возникающих во внутренних перегородках современных зданий [Текст] / В.Н. Деркач // Вестник Брестского государственного технического университета / Строительство и архитектура. – 2010. – №1. – С. 43-45.
2. СНиП II-22-81* Каменные и армокаменные конструкции [Текст] / Госстрой СССР. – М: Стройиздат, 1983. – 40 с.
3. EN 1996-1-1:2005 Eurocode 6. – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. – 127 s.
4. ASI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ASI 318-02). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
5. Баранова, Т.И. Характер сопротивления и оценка прочности стеновых панелей с отверстиями прямоугольного и овального очертания на основе каркасно-стержневых моделей [Текст] / Т.И. Баранова, А.С. Шкутов // АCADEMIA. Архитектура и строительство. – М: РААСН. – 2007. – №3. – С. 69-75.
6. Соколов, Б.С. Прочность и трещиностойкость стеновых панелей зданий [Текст] / Б.С. Соколов. – М.: АСВ. – 2010. – 128 с.
7. Schweizer Norm SIA 177/2 Bemessung von Mauerwerkswänden, Ausgabe 1992. – Schweizerischer Ingenieur- und Architekten. – Verein, Zurich. – 1992.
8. Hamid A., Drysdale R.G. Behavior of Brick Masonry Under Combined Shear and Compression Loading. Proc. Of the 2nd Canadian Masonry Symposium. – Ottawa. – 1980. – P. 51-64.
9. Drysdale, R.G. Tensile Strength of Brick Masonry [Текст] / R.G. Drysdale, A. Hamid. Proc. Of the Inter. J. of Masonry Construction, 2(4). – 1982. – P. 172-177.
10. RILEM LUMB6 1991. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM. – 5 p.
11. Orłowicz R. Wzmocnienie murów zginanych głównie w swojej płaszczyźnie [Текст] / R. Orłowicz, L. Malyszko // Konferencja REMO-2002. – Wrocław. – 2002. – S. 217-223.
12. Малышко, Л. Моделирование разрушения в каменных конструкциях с учетом анизотропии [Текст] / Л. Малышко: дис. ... д.т.н. – Варминско-Мазурский университет, Польша. – 2005. – 157 с.
13. Lourenco, P.B. Multisurface interface model for analysis of masonry structures [Текст] / P.B. Lourenco, J.G. Rots // Journal of Engineering Mechanics, ASCE. – 123(7). – 1997. – S. 660-668.

Деркач Валерий Николаевич

Филиал Республиканского унитарного предприятия «Институт БелНИИС»
«Научно-технический центр», Республика Беларусь, г. Брест
Кандидат технических наук
Тел.: +375 (162) 41-19-61
E-mail: v-derkach@yandex.ru

Орлович Роман Болеславович

Западно-Померанский технологический университет, Республика Польша, г. Щецин
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции»
E-mail: orlowicz@mail.ru

DERKATCH V.N., ORLOVICH R.B.

ABOUT APPLICATION OF ROD MODELS IN CALCULATIONS OF THE STONE FILLING OF FRAMEWORK BUILDINGS

The approaches to the calculation of the stone walls of frame buildings with a frame-core model. The features of frame-core model for calculating the stone-govermental batches, techniques for assessing the strength of selection in the direction of principal compressive stress-making band of masonry. The results of experimental studies to determine the strength of samples of brickwork in compression and tension at an angle to the horizontal mortar joints of brick and reinforced beams-walls. Experimental and numerical study of the rock treasure-kiconfirm the use of frame-core similarities in calculating the concentration of stone constructions.

Keywords: *the constricted strip, a masonry, anisotropic properties.*

BIBLIOGRAPHY

1. Derkach, V.N. O morfologii trewin, vznikajuwih vo vnutrennih peregorodkah sovremennyh zdaniy [Tekst] / V.N. Derkach // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta / Stroitel'stvo i arhitektura. – 2010. – №1. – S. 43-45.
2. SNiP II-22-81* Kamennye i armokamennye konstrukcii [Tekst] / Gosstroj SSSR. – M: Strojizdat, 1983. – 40 s.
3. EN 1996-1-1:2005 Eurocode 6. – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. – 127 s.
4. ASI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ASI 318-02). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
5. Baranova, T.I. Harakter soprotivlenija i ocenka prochnosti stenovyh panelej s otverstijami prjamougol'nogo i oval'nogo ochertanija na osnove karkasno-sterzhnevnyh modelej [Tekst] / T.I. Baranova, A.S. Shkutov // ACADEMIA. Arhitektura i stroitel'stvo. – M: RAASN. – 2007. – №3. – S. 69-75.
6. Sokolov, B.S. Prochnost' i trewinostojkost' stenovyh panelej zdaniy [Tekst] / B.S. Sokolov. – M.: ASV. – 2010. – 128 s.
7. Schweizer Norm SIA 177/2 Bemessung von Mauerwerkswänden, Ausgabe 1992. – Schweizerischer Ingenieur- und Architekten. – Verein, Zurich. – 1992.
8. Hamid A., Drysdale R.G. Behavior of Brick Masonry Under Combined Shear and Compression Loading. Proc. Of the 2nd Canadian Masonry Symposium. – Ottawa. – 1980. – P. 51-64.
9. Drysdale, R.G. Tensile Strength of Brick Masonry [Tekst] / R.G. Drysdale, A. Hamid. Proc. Of the Inter. J. of Masonry Construction, 2(4). – 1982. – P. 172-177.
10. RILEM LUMB6 1991. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM. – 5 p.
11. Orłowicz R. Wzmocnienie murów zginanych głównie w swojej płaszczyźnie [Tekst] / R. Orłowicz, L. Malyszko // Konferencya REMO-2002. – Wrocław. – 2002. – S. 217-223.
12. Malyszko, L. Modelirovanie razrushenija v kamennyh konstrukcijah s uchetom anizotropii [Tekst] / L. Malyszko: dis. ... d.t.n. – Varminsko-Mazurskij universitet, Pol'sha. – 2005. – 157 s.
13. Lourenco, P.B. Multisurface interface model for analysis of masonry structures [Tekst] / P.B. Lourenco, J.G. Rots // Journal of Engineering Mechanics, ASCE. – 123(7). – 1997. – S. 660-668.

Derkach Valery Nikolaevich

Branch of Republican unitary enterprise «Institute BelSRIB»

«Scientific and technical center», Republic Belarus, Brest

Candidate of technical science

Ph.: +375 (162) 41-19-61

E-mail: v-derkach@yandex.ru

Orłowicz Roman Boleslavovich

West Pomeranian technological university, Republic Poland, Szczecin

Doctor of technical science, professor, head of department «Building designs»

E-mail: orlowicz@mail.ru

КАЗАКОВ Д.В.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Приведены результаты специально поставленных экспериментальных исследований внецентренно нагруженных железобетонных элементов составного сечения. Построены графики экспериментальных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в поперечном сечении опытного образца на разных уровнях силового сопротивления внецентренно сжатых элементов. Установлены характерные схемы трещинообразования в растянутом бетоне и характерные схемы разрушения сжатого бетона для рассматриваемых составных элементов.

Ключевые слова: железобетон, внецентренное нагружение, деформации, кривизна.

Анализ опытных данных перемещений опытных образцов позволяет отметить следующее (рисунок 1).

В процессе нагружения опытных образцов до уровня разрушающей нагрузки на графиках можно выделить три характерных участка деформаций. Первый участок в пределах 4 кН имел характер деформации близких к линейному. Второй участок при нагрузках более 4 кН характеризовался постепенным увеличением приращений прогибов по мере увеличения нагрузки, что было связано с возникновением проявления упруго-пластических деформаций в сжатом бетоне и началом трещинообразования в растянутой зоне (N_{cr1}).

Третий участок начинался с момента образования трещин в шве контактов двух бетонов при нагрузке порядка 8-9 кН и характеризовался резким нарастанием прогибов по мере увеличения нагрузки.

Образование в опытных конструкциях первых трещин (тр.1) шириной раскрытия 0,04-0,1 мм наблюдалось в растянутой зоне составных балок на 2-3 ступенях нагружения, что для всех опытных образцов соответствовало значению сосредоточенной силы 4-5 кН (рисунки 2, 3). Первые трещины образовывались в средней части пролета растянутой зоны сечения. Характерной особенностью развития трещин было то, что экспериментально подтвердился сдерживающий эффект раскрытия трещин арматурой. Другими словами плоскость поверхности трещин в зоне пересечения ее с арматурой деформируется. Это наглядно видно из замеренных в опытах значений a_{cr} по высоте растянутой зоны (рисунок 4).

По мере увеличения нагрузки процесс трещинообразования продолжался и появлялись новые трещины в растянутой зоне опытных образцов с максимальной шириной раскрытия 0,15-0,16 мм. При этом сдерживающий эффект раскрытия трещин на уровне арматурного стержня сохранился до нагрузки 8-9 кН, соответствующие нагрузке образования продольных трещин (тр. 2).

Схема разрушения опытных образцов характеризовалась хрупким разрушением бетона сжатой зоны, в виде выколов отдельных фрагментов. До начала разрушения при нагрузке 9-10 кН в опытных конструкциях образовывалась продольная трещина по шву сопряжения двух бетонов. Образование продольной трещины приводило к резкому нарастанию прогибов образца и практически через 1-2 ступени нагружения происходило его разрушение.

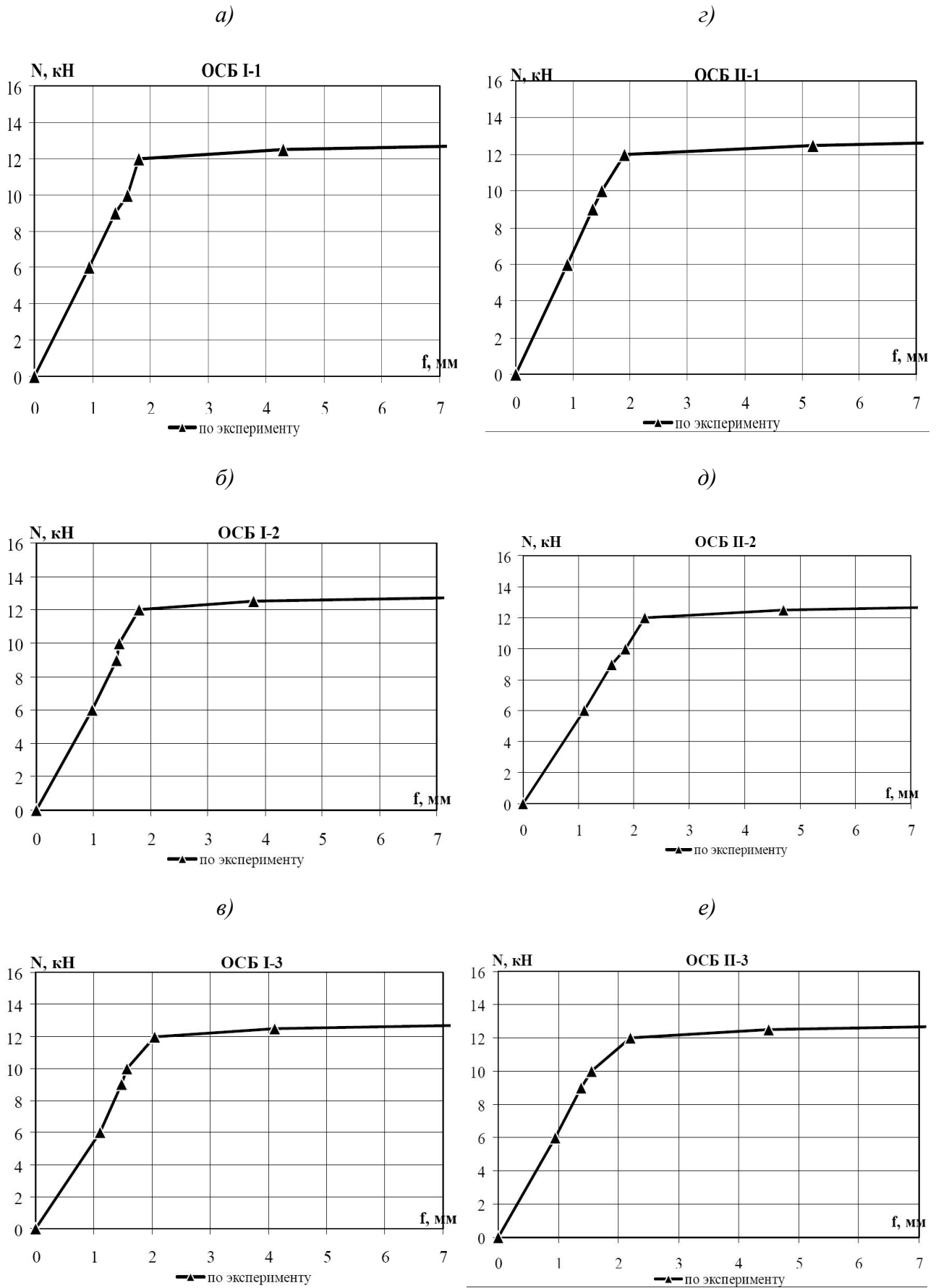
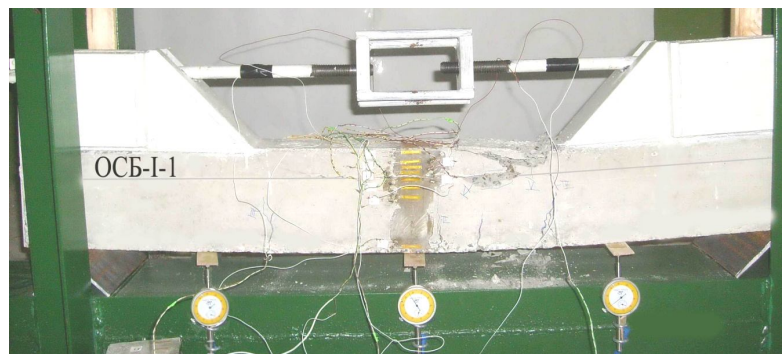
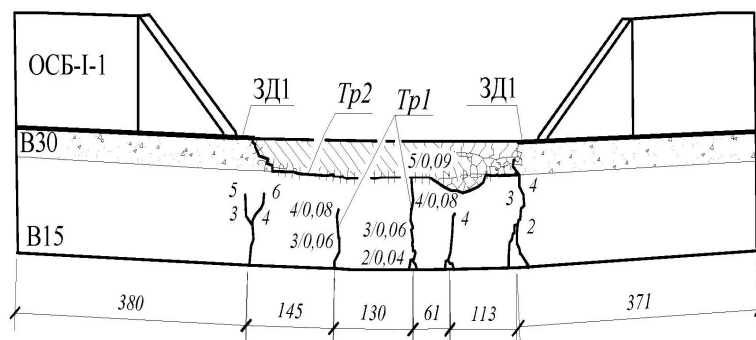


Рисунок 1 – Диаграммы «нагрузка-прогиб» в середине пролета опытных образцов первой (а, б, в) и второй (з, д, е) серии

а)



б)



в)

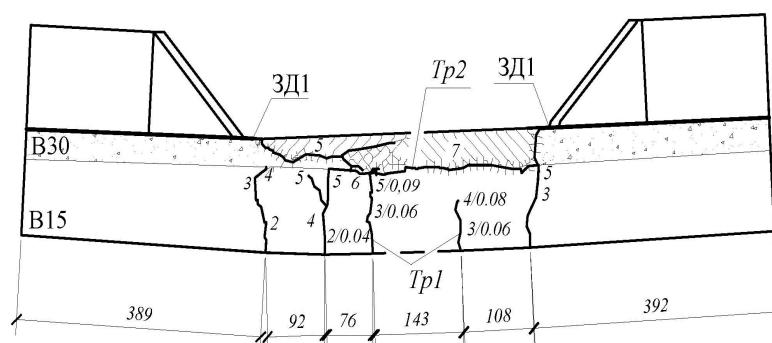
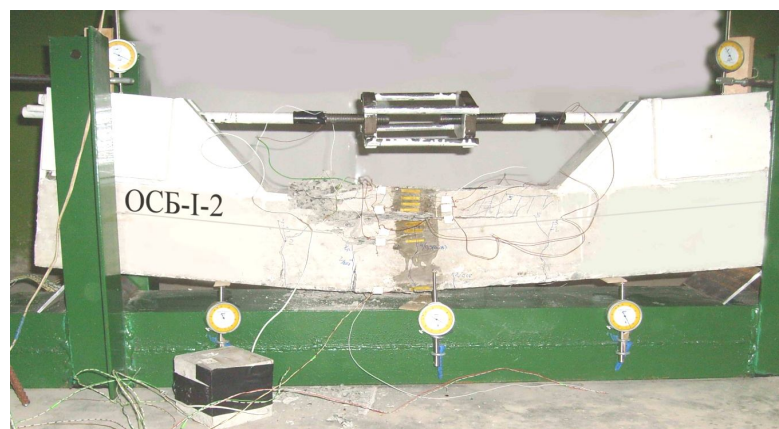


Рисунок 2 – Общая картина трещин в первом опытном образце ОСБ-I-1 первой серии: а – общий вид; б – передняя грань; в – задняя грань

Начало рисунка 3

а)



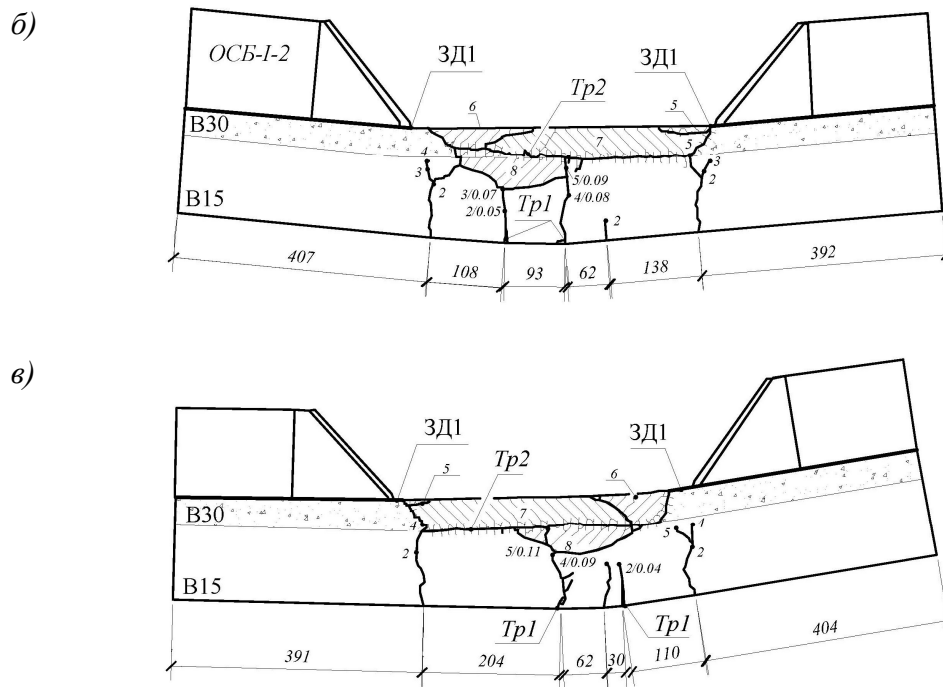


Рисунок 3 – Общая картина трещин во втором опытном образце ОСБ-I-2 первой серии: а – общий вид; б – передняя грань; в – задняя грань

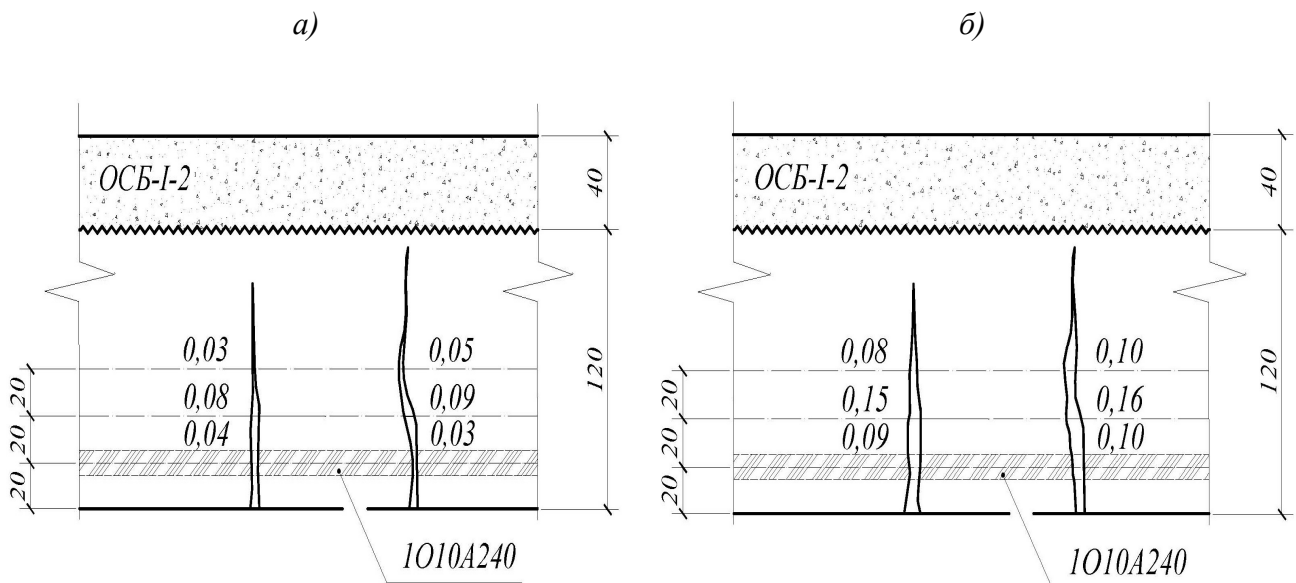


Рисунок 4 – Схема развития и раскрытия нормальных трещин по высоте сечения в опытном образце первой серии ОСБ-I-2: а – при нагрузке 4 кН; б – при нагрузке 6 кН

Полученные опытные значения деформаций сжатого бетона позволяют отметить следующее (рисунок 5).

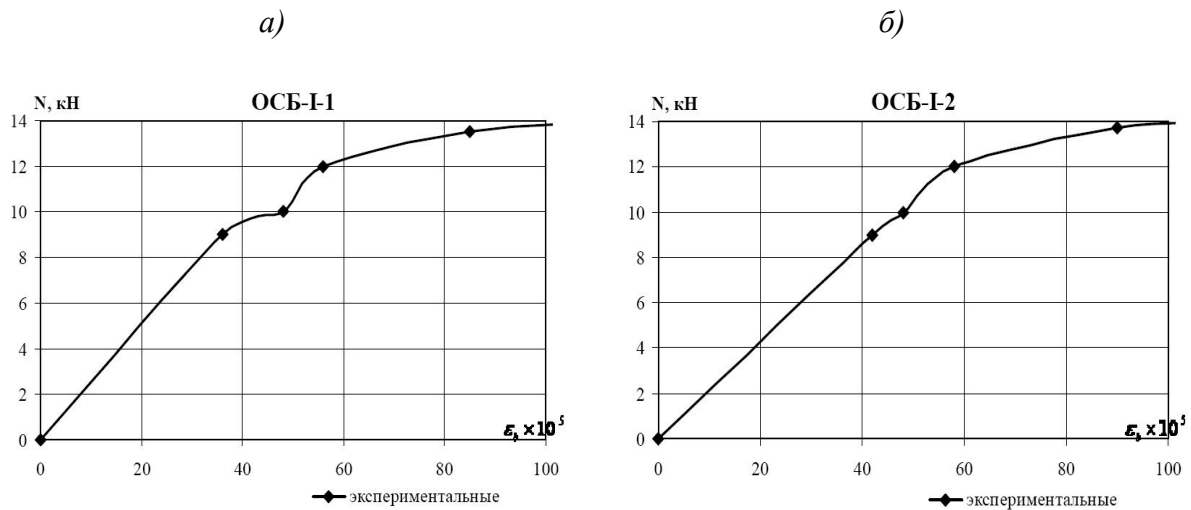


Рисунок 5 – Экспериментальные фибровые деформации сжатого бетона в опытных образцах первой серии: а – ОСБ-I-1 б – ОСБ-I-2

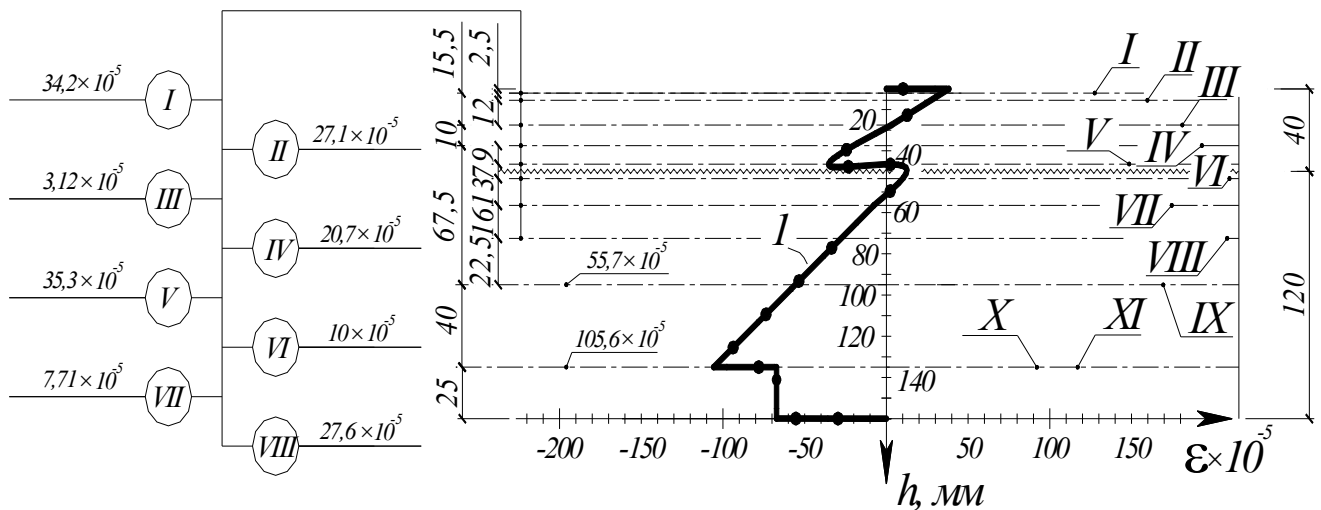


Рисунок 6 – График экспериментальных деформаций сжатого бетона и растянутой Арматуры в поперечном сечении опытного образца ОСБ-I-1 расположенного в середине пролета; I-XI – оси баз электротензорезисторов; 1 – ступень нагружения 9 кН; приведены относительные деформации бетона на ступени нагружения 9 кН

Полученные опытные данные позволяют выполнить оценку эффективности предложенной уточненной расчетной модели сопротивления составных внецентренно-сжатых железобетонных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков, Д.В. Методика экспериментального определения кривизн и эффекта нарушения сплошности при трещинообразовании в составных железобетонных элементах [Текст] / Д.В. Казаков, Вл.И. Колчунов, В.С. Федоров // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – № 6(32). – С. 21-24.

Казаков Дмитрий Вячеславович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Строительство автомобильных дорог»

Тел.: +7 (4862) 76-03-72

E-mail: dkazakov84@yandex.ru

KAZAKOV D.V.

SOME RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESSES OF COMPOSITE CRACKING IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

The paper presents the results of specially performed experimental researches on eccentrically loaded compound reinforced concrete elements. As a result there are plotted diagrams of actual strains of the compressed concrete and tensed reinforcing bars in cross-section of a test model at different levels of stress growing for eccentrically compressed elements. Also there are typical schemes for crack growth in tensed concrete and typical schemes of destruction of compressed concrete for considered elements.

Keywords: reinforced concrete, eccentric loading, deformations, curvature.

BIBLIOGRAPHY

1. Kazakov D.V. Metodika jeksperimental'nogo opredelenija krivizn i jeffekta narushenija sploshnosti pri trevinoobrazovanii v sostavnyh zhelezobetonnyh jelementah [Tekst] / D.V. Kazakov, V.I. Kolchunov, V.S. Fedorov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: OrelGTU, 2010. – №6(32). – S. 21-24.

Kazakov Dmitry Vjacheslavovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel

Senior lecturer of department «Construction of highways»

Ph.: +7 (4862) 76-03-72

E-mail: dkazakov84@yandex.ru

КОРОБКО В.И., АКТУГАНОВ А.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИНОК НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Задача поперечного изгиба прямоугольных пластинок с комбинированными граничными условиями (все возможные комбинации шарнирного опирания и жесткого защемления по сторонам) на упругом основании, нагруженных равномерно распределенной по всей площади нагрузкой, решается методом интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ). Для каждой комбинации граничных условий построены аппроксимирующие функции для подсчета двух вспомогательных коэффициентов, необходимых для выбора опорных решений при использовании методики МИКФ.

Ключевые слова: прямоугольные пластинки, комбинированные граничные условия, максимальный прогиб, упругое основание, коэффициент постели, коэффициент формы, метод интерполяции по коэффициенту формы.

Пластинки на упругом основании широко используются в строительстве. К ним относятся фундаменты зданий и сооружений, настилы, покрытия автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов, днища резервуаров и емкостей. Работа таких конструкций в условиях эксплуатации оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние всего сооружения. Расчет пластинок сложного вида с различными комбинациями граничных условий является весьма трудной задачей, которая решается в настоящее время в основном с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Однако по-прежнему в строительной механике актуальной остается проблема развития аналитических методов расчета таких пластинок, позволяющих с помощью достаточно простых функциональных зависимостей проводить анализ напряженно-деформированного состояния пластинок на упругом основании.

В научной литературе приводятся аналитические решения задачи по определению максимального прогиба прямоугольных пластинок на упругом основании лишь для частного случая, когда пластинка шарнирно оперта по двум противоположным сторонам, а по двум другим сторонам имеются произвольные граничные условия.

Метод интерполяции по коэффициенту формы до настоящего времени в расчете пластинок на упругом основании не применялся. Однако в статье [1] приводятся исследования, позволяющие сделать вывод о перспективности его применения к таким задачам. Используя этот метод, можно получать удовлетворительные оценки интегральных физических характеристик пластинок (таких как максимальный прогиб) без решения сложных дифференциальных уравнений и использования мощных ЭВМ.

Для расчета пластинок сложных форм с помощью МИКФ необходимо предварительно получить граничные кривые «максимальный прогиб – коэффициент формы», на которых будут лежать «опорные» решения [2]. Для трапециидальных и параллелограммных пластинок одну из границ будут образовывать решения, полученные для прямоугольных пластинок. Построению этих границ для прямоугольных пластинок с различными комбинациями граничных условий (рисунок 1) и посвящена предлагаемая статья.

В статье [1] при исследовании вопроса о возможности использования МИКФ для определения максимального прогиба пластинок на упругом основании была получена формула:

$$\frac{1}{w_0} = \frac{1}{q} \left[\frac{D}{A^2} B + kC \right], \quad (1)$$

где B и C – коэффициенты пропорциональности, зависящие от формы пластинки и вида гра-

ничных условий; q – интенсивность равномерно распределенной нагрузки; k – коэффициент постели; A – площадь пластинки; D – ее цилиндрическая жесткость.

Коэффициенты B и C могут быть найдены, если известен максимальный прогиб пластинки при двух значениях коэффициента постели, причем один из них должен быть равен нулю, т.е. соответствовать решению для пластинки без упругого основания, а второй иметь произвольное не равное нулю значение:

$$\frac{1}{w_{0(k=0)}} = \frac{D}{qA^2} B \Rightarrow B = \frac{1}{w_{0(k=0)}} \frac{qA^2}{D}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{w_{0(k \neq 0)}} = \frac{D}{qA^2} B + \frac{k}{q} C = \frac{1}{w_{0(k=0)}} + \frac{k}{q} C,$$

$$\frac{1}{w_{0(k \neq 0)}} - \frac{1}{w_{0(k=0)}} = \frac{k}{q} C \Rightarrow C = \frac{q}{k} \left(\frac{1}{w_{0(k \neq 0)}} - \frac{1}{w_{0(k=0)}} \right). \quad (3)$$

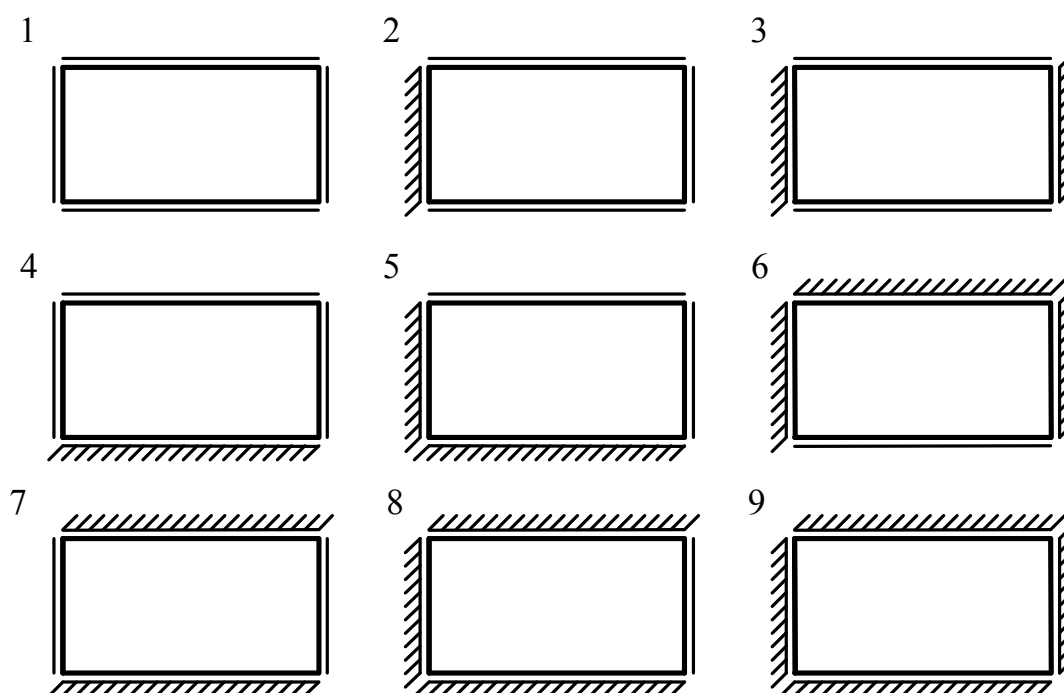


Рисунок 1 – Комбинации граничных условий для прямоугольной пластинки:
«жесткое защемление – шарнирное опирание»

Значения параметров B и C не зависят от площади пластинки, коэффициента постели, цилиндрической жесткости и интенсивности равномерно распределенной нагрузки, их величина определяется лишь значением коэффициента формы и видом граничных условий. Значения $w_{0(k \neq 0)}$ и $w_{0(k=0)}$ могут быть найдены с помощью приближенных методов строительной механики.

Сведем в одну таблицу значения параметров B и C , вычисленные с использованием МКЭ в программном комплексе «SCAD». Расчет производился при следующих параметрах: материал пластинок – сталь ($E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$), толщина $h = 50$ мм, $A = 1$ м², интенсивность равномерно распределенной нагрузки $q = 40$ кН/м², число конечных элементов 225. Значение величины $w_{0(k \neq 0)}$ определялось при коэффициенте постели $k = 300$ МПа/м.

На основании табличных данных на рисунках 2 и 3 построены кривые $B - K_f$ и $C - K_f$.

Таблица 1 – Сопоставление значений параметров В и С, полученных с помощью МКЭ и аппроксимирующих функций (4)...(21)

a/b		1	1,21	1,32	1,44	1,56	1,69	1,82	1,96	2,25	2,56	2,89
K_f		8	8,15	8,32	8,54	8,81	9,13	9,49	9,88	10,78	11,8	12,94
Значения параметра В												
«1»	МКЭ	0,250	0,259	0,271	0,286	0,306	0,329	0,357	0,390	0,469	0,570	0,695
	(2)	0,247	0,258	0,269	0,286	0,306	0,330	0,359	0,392	0,471	0,571	0,692
	Δ , %	-1,2	-0,39	-0,74	0	0	0,30	0,59	0,51	0,43	0,18	-0,43
«2»	МКЭ	0,356	0,335	0,336	0,343	0,355	0,373	0,396	0,424	0,496	0,591	0,712
	(4)	0,356	0,336	0,336	0,343	0,355	0,373	0,396	0,424	0,496	0,591	0,712
	Δ , %	0	0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
«3»	МКЭ	0,531	0,458	0,440	0,432	0,433	0,441	0,456	0,477	0,539	0,626	0,741
	(6)	0,530	0,458	0,439	0,432	0,433	0,441	0,456	0,477	0,539	0,626	0,741
	Δ , %	-0,19	0	-0,23	0	0	0	0	0	0	0	0
«4»	МКЭ	0,356	0,408	0,446	0,493	0,547	0,612	0,686	0,771	0,977	1,24	1,56
	(8)	0,369	0,400	0,435	0,483	0,541	0,611	0,691	0,781	0,993	1,25	1,54
	Δ , %	3,65	-2,00	-2,47	-2,03	1,10	-0,16	0,73	1,30	1,64	0,81	-1,28
«5»	МКЭ	0,461	0,484	0,511	0,548	0,595	0,653	0,721	0,801	0,998	1,25	1,57
	(10)	0,460	0,483	0,511	0,548	0,596	0,654	0,723	0,803	0,999	1,25	1,56
	Δ , %	-0,22	-0,21	0	0	0,17	0,15	0,28	0,25	0,10	0	-0,64
«6»	МКЭ	0,636	0,606	0,615	0,637	0,672	0,719	0,779	0,852	1,04	1,28	1,59
	(12)	0,637	0,607	0,615	0,637	0,672	0,719	0,779	0,852	1,04	1,28	1,59
	Δ , %	0,16	0,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
«7»	МКЭ	0,531	0,666	0,756	0,863	0,988	1,13	1,30	1,49	1,95	2,52	3,21
	(14)	0,533	0,662	0,757	0,864	0,989	1,13	1,30	1,49	1,95	2,52	3,21
	Δ , %	0,38	-0,60	0,13	0,12	0,10	0	0	0	0	0	0
«8»	МКЭ	0,636	0,738	0,816	0,913	1,03	1,17	1,33	1,51	1,96	2,52	3,21
	(16)	0,650	0,715	0,792	0,894	1,02	1,17	1,34	1,54	1,99	2,54	3,17
	Δ , %	2,15	-3,12	-2,94	-2,08	0,97	0	0,75	1,99	1,53	0,79	-1,25
«9»	МКЭ	0,809	0,858	0,917	0,998	1,10	1,23	1,38	1,55	1,98	2,53	3,22
	(18)	0,815	0,864	0,921	1,000	1,10	1,22	1,37	1,54	1,97	2,53	3,23
	Δ , %	0,74	0,70	0,44	0,2	0	-0,81	-0,73	-0,65	-0,51	0	0,31
Значения параметра 1000С												
«1»	МКЭ	0,659	0,661	0,664	0,667	0,671	0,676	0,681	0,687	0,7	0,714	0,728
	(3)	0,653	0,657	0,661	0,666	0,672	0,678	0,685	0,692	0,705	0,718	0,73
	Δ , %	-0,91	-0,61	-0,45	-0,15	0,15	0,30	0,58	0,72	0,71	0,56	0,27
«2»	МКЭ	0,654	0,653	0,654	0,656	0,659	0,663	0,668	0,674	0,686	0,701	0,716
	(5)	0,648	0,650	0,653	0,657	0,661	0,666	0,672	0,678	0,691	0,704	0,717
	Δ , %	-0,93	-0,46	-0,15	0,15	0,30	0,45	0,60	0,59	0,73	0,43	0,14
«3»	МКЭ	0,657	0,652	0,652	0,653	0,655	0,658	0,663	0,667	0,679	0,693	0,707
	(7)	0,653	0,653	0,654	0,655	0,656	0,658	0,662	0,666	0,677	0,692	0,707
	Δ , %	-0,61	0,15	0,31	0,31	0,15	0	-0,15	-0,15	-0,29	-0,14	0
«4»	МКЭ	0,654	0,661	0,666	0,672	0,679	0,686	0,695	0,704	0,722	0,739	0,754
	(9)	0,654	0,659	0,665	0,672	0,679	0,688	0,697	0,705	0,723	0,738	0,752
	Δ , %	0	-0,30	-0,15	0	0	0,29	0,29	0,14	0,14	-0,14	-0,27
«5»	МКЭ	0,649	0,654	0,657	0,661	0,668	0,675	0,683	0,692	0,711	0,730	0,746
	(11)	0,646	0,651	0,656	0,662	0,670	0,678	0,686	0,695	0,712	0,728	0,743
	Δ , %	-0,46	-0,46	-0,15	0,15	0,30	0,44	0,44	0,43	0,14	-0,27	-0,40
«6»	МКЭ	0,650	0,650	0,653	0,657	0,662	0,668	0,675	0,683	0,701	0,720	0,737
	(13)	0,644	0,648	0,652	0,658	0,664	0,671	0,678	0,686	0,702	0,718	0,734
	Δ , %	-0,92	-0,31	-0,15	0,15	0,30	0,45	0,44	0,44	0,14	-0,28	-0,41
«7»	МКЭ	0,657	0,670	0,678	0,689	0,700	0,711	0,723	0,734	0,754	0,768	0,777
	(15)	0,664	0,671	0,678	0,687	0,698	0,709	0,720	0,731	0,751	0,769	0,784
	Δ , %	1,07	0,15	0	0,29	-0,29	-0,28	-0,42	-0,41	-0,40	0,13	0,90
«8»	МКЭ	0,650	0,659	0,667	0,676	0,686	0,698	0,710	0,722	0,744	0,762	0,774
	(17)	0,652	0,659	0,667	0,676	0,687	0,698	0,710	0,721	0,742	0,761	0,777
	Δ , %	0,31	0	0	0	0,15	0	0	-0,14	-0,27	-0,13	-0,39
«9»	МКЭ	0,651	0,656	0,662	0,669	0,678	0,689	0,700	0,711	0,734	0,753	0,767
	(19)	0,647	0,654	0,661	0,670	0,681	0,691	0,702	0,713	0,733	0,750	0,765
	Δ , %	-0,61	-0,31	-0,15	0,15	0,15	0,29	0,29	0,28	-0,14	-0,40	-0,26

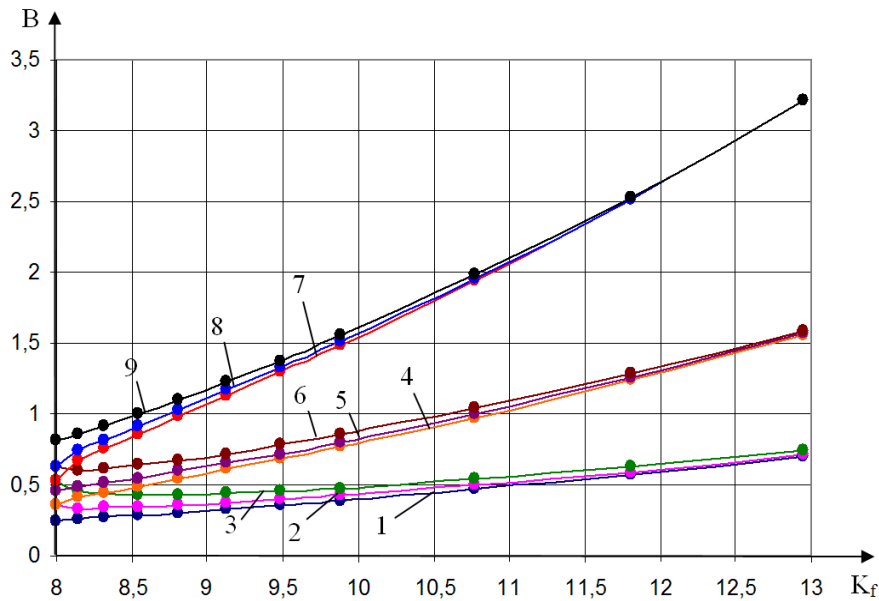


Рисунок 2 – Кривые $V - K_f$ для прямоугольных пластинок на упругом основании с комбинациями граничных условий по рисунку 1

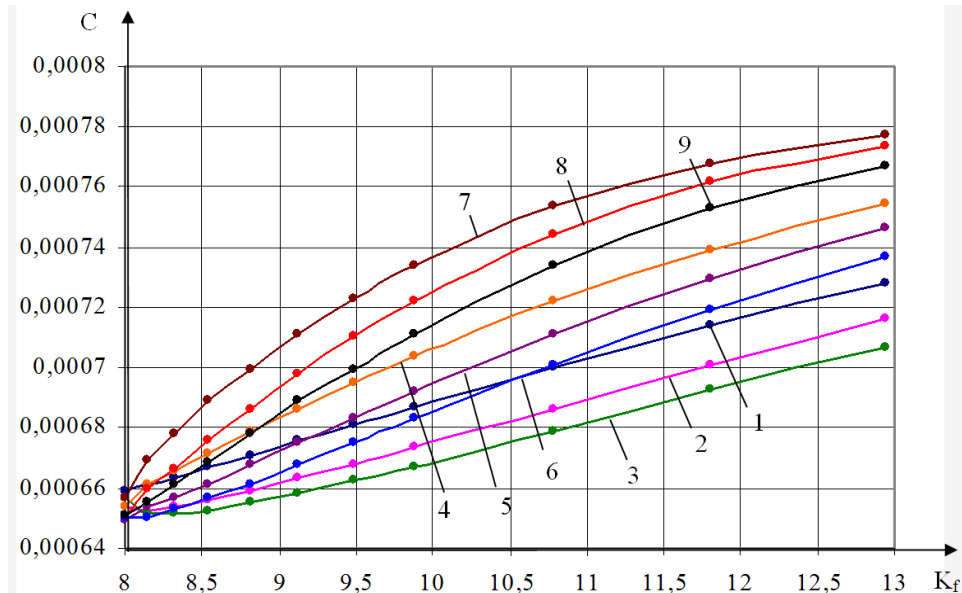


Рисунок 3 – Кривые $C - K_f$ для прямоугольных пластинок на упругом основании с комбинациями граничных условий по рисунку 1

Используя программный комплекс TableCurve 2D, по табличным данным построены следующие аппроксимирующие функции:

при 1-й комбинации граничных условий (рисунок 1):

$$V = a + bK_f^2, \quad (4)$$

где $a = -0,02764$; $b = 0,004297$;

$$C = a + \frac{b}{K_f}, \quad (5)$$

где $a = -0,0008549$; $b = -0,001612$;

при 2-й комбинации граничных условий:

$$B = \frac{a + cK_f^2 + eK_f^4 + gK_f^6}{1 + bK_f^2 + dK_f^4 + fK_f^6}, \quad (6)$$

где $a = -0,03294$; $b = -0,03996$; $c = 0,004498$; $d = 0,000391$; $e = -0,000157$; $f = -1,287 \cdot 10^{-7}$;

$$g = 1,49 \cdot 10^{-6};$$

$$C = \frac{a + cK_f^2}{1 + bK_f^2}, \quad (7)$$

где $a = 0,0005378$; $b = 0,0093875$; $c = 7,8 \cdot 10^{-6}$;
при 3-й комбинации граничных условий:

$$B = \frac{a + cK_f^2 + eK_f^4 + gK_f^6}{1 + bK_f^2 + dK_f^4 + fK_f^6}, \quad (8)$$

где $a = -0,03224$; $b = -0,0384$; $c = 0,003638$; $d = 0,000367$; $e = -0,000134$; $f = -1,397 \cdot 10^{-7}$;
 $g = 1,336 \cdot 10^{-6}$;

$$C = \frac{a + cK_f^{0,5} + eK_f}{1 + bK_f^{0,5} + dK_f}, \quad (9)$$

где $a = -0,0007978$; $b = -0,61396$; $c = -0,0005036$; $d = 0,10921$; $e = 8,95 \cdot 10^{-5}$;
при 4-й комбинации граничных условий:

$$B = a + b K_f^{1,5}, \quad (10)$$

где $a = -0,7364$; $b = 0,04887$;

$$C = \frac{K_f^2}{aK_f^2 + b}, \quad (11)$$

где $a = 1207,3$; $b = 20538,7$;
при 5-й комбинации граничных условий:

$$B = (a + bK_f)^2, \quad (12)$$

где $a = -0,24725$; $b = 0,1157$;

$$C = a + \frac{b}{K_f}, \quad (13)$$

где $a = -0,0008996$; $b = 0,002025$;
при 6-й комбинации граничных условий:

$$B = \frac{a + cK_f^2 + eK_f^4 + gK_f^6}{1 + bK_f^2 + dK_f^4 + fK_f^6}, \quad (14)$$

где $a = -0,3971$; $b = -0,04617$; $c = 0,02443$; $d = 0,00049$; $e = -0,000599$; $f = -1,255 \cdot 10^{-7}$;
 $g = 4,956 \cdot 10^{-6}$;

$$C = \frac{K_f}{aK_f + b}, \quad (15)$$

где $a = -1056,9$; $b = 3957,8$;
при 7-й комбинации граничных условий:

$$B = \frac{a + c \cdot K_f^2 + eK_f^4}{1 + b K_f^2 + dK_f^4}, \quad (16)$$

где $a = -0,8845$; $b = -0,01624$; $c = 0,0389$; $d = 2,897 \cdot 10^{-7}$; $e = -0,000397$;

$$C = a + \frac{b}{K_f^2}, \quad (17)$$

где $a = -0,06903$; $b = 0,004678$;
при 8-й комбинации граничных условий:

$$B = a + bK_f^{1,5}, \quad (18)$$

где $a = -1,73256$; $b = 0,10529$,

$$C = a + \frac{b}{K_f^2}, \quad (19)$$

где $a = 0,0008539$; $b = -0,0195$;

при 9-й комбинации граничных условий:

$$B = (a + bK_f)^2, \quad (20)$$

где $a = -0,5422$; $b = 0,1806$;

$$C = a + \frac{b}{K_f^2}, \quad (21)$$

где $a = -0,0008377$; $b = 0,01219$.

Погрешность результатов, полученных с помощью функций (4)...(21), не превышает 4%.

Сложный вид некоторых аппроксимирующих функций и большое количество знаков после запятой у коэффициентов пропорциональности были приняты с целью обеспечения высокой точности решений, получаемых с помощью этих функций, т.к. они в дальнейшем будут использованы для разработки программного комплекса.

Таким образом, зная коэффициент формы заданной прямоугольной пластинки, можно, используя аппроксимирующие функции $B - K_f$ и $C - K_f$, соответствующие заданным граничным условиям, найти значения параметров B и C , и, воспользовавшись формулой (1), определить ее максимальной прогиб.

Выводы

1 Для прямоугольных пластинок с комбинированными граничными условиями, лежащих на упругом основании, построены аппроксимирующие функции $B - K_f$ и $C - K_f$, входящие в выражение (1), для определения максимального прогиба прямоугольных пластинок, находящихся под действием равномерно распределенной нагрузки.

2 Все множество значений параметра B для всех комбинаций граничных условий, представленное в координатах $B - K_f$ при любых значениях коэффициента постели, ограничено с двух сторон соответствующими значениями этих параметров для пластинок с однородными граничными условиями (шарнирное опирание и жесткое защемление).

3 Полученные аппроксимирующие функции могут использоваться для непосредственного расчета прямоугольных пластинок с комбинированными граничными условиями, лежащих на упругом основании, а также в качестве граничных кривых при расчете параллелограммных и трапециидальных пластинок с помощью МИКФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. Расчет пластинок на упругом основании методом интерполяции по коэффициенту формы [Текст] / В.И. Коробко, А.А. Актуганов // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2010 году. – Москва-Орел, 2011. – С. 261-267.
2. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.

Коробко Виктор Иванович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail center_epb@mail.ru

Актуганов Александр Анварович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Студент кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail: center_epb@mail.ru

KOROBKO V.I., AKTUGANOV A.A.

DEFINITION OF THE MAXIMAL DEFLECTION RECTANGULAR PLATES ON THE ELASTIC BASIS WITH COMBINED BOUNDARY CONDITIONS

Task of cross-bending of rectangular plates with the combined scope terms (all possible combinations of the joint leaning and gesture-who jammings on sides) on resilient foundation, loaded with the equipartition on all area loading decides the method of interpolation on the coefficient of form (MIKF). For every combination of scope terms approximating functions are built for the count of two auxiliary coefficients, necessary for the choice of supporting decisions at the use of method of MIKF.

Keywords: *rectangular plates, combined scope terms, maximal bending, resilient foundation, coefficient of bed, coefficient of form, method of interpolation on the coefficient of form.*

BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. Raschet plastinok na uprugom osnovanii metodom interpoljacji po koeficientu formy [Tekst] / V.I. Korobko, A.A. Aktuganov // Fundamental'nye issledovanija RAASN po nauchnomu obespečeniju razvitija arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2010 godu. – Moskva-Orel, 2011. – S. 261-267.
2. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: ASV, 1999. – 320 s.

Korobko Victor Ivanovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel
Doctor of technical science, professor of department «Building designs and materials»
Ph.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail: center_epb@mail.ru

Aktuganov Alexander Anvarovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel
The student of faculty «Building designs and materials»
Ph.: +7 (4862) 73-43-95
E-mail: center_epb@mail.ru

КУПЧИКОВА Н.В.

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ СВАЙ, УСИЛЕННЫХ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ ГРУНТА ПОД ЕЕ НИЖНИМ КОНЦОМ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ И ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЗАГРУЖЕНИИ

Рассмотрена физическая и математическая модели силового взаимодействия свай с концевыми уширениями с грунтовым основанием. Дана оценка влияния трения по длине свай с уширением на ее несущую способность. Адаптирован деформационный метод расчета свай к деформационной оценке свай с концевыми уширениями. Приведены сравнения результатов расчета по разработанной методике с экспериментальными данными (лабораторными исследованиями). Проведенное сравнение показало достаточно хорошее совпадение результатов.

Ключевые слова: сваи, концевое уширение, жесткость, коэффициент постели.

Одним из рациональных и эффективных способов усиления свайных фундаментов является устройство концевых уширений свай [1]. Способ создания концевого уширения включает погружение сваи в проектное положение методом подмыва грунта, а затем осуществляется подача цементного молока по той же трубке, которая использовалась при погружении. Экспериментальными исследованиями выявлены правильность округлой формы уширения симметричной относительно сваи, оптимальное водоцементное отношение твердеющего состава, при котором прочность цементно-грунтового уширения составила наибольшую величину равную 400 Н/см^2 .

Вокруг уширения под нижним концом сваи создается некоторый объем грунта, уплотненного при ее погружении. Допустим, что этот объем имеет цилиндрическую форму, ось которой совпадает с осью сваи (рисунок 1). Тогда имеем: слой уплотненного грунта $l_{\text{упл}} = r_{\text{уп.гр.}} \cdot r_{\text{уш}}$ и сдвигаемый слой грунта вокруг уширения $l_{\text{сдв}} = r_{\text{сдв}} - r_{\text{уш}}$, а средняя сдвигаемая площадь грунта в цилиндре размером $(r_{\text{сдв}} - r_{\text{уш}})$ будет равна:

$$A_{\text{ср}} = 2\pi \cdot [(r_{\text{сдв}} - r_{\text{уш}})/2] \cdot h_{\text{уш}},$$

где $r_{\text{сдв.}}$ – радиус границы сдвигаемого грунта; $r_{\text{уш.}}$ – радиус уширения, $h_{\text{уш.}}$ – высота уширения.

Сдвиговая жесткость грунта вокруг уширения определяется равенством:

$C_{\text{гр}} = G_{\text{гр}} \cdot A_{\text{гр}} = \pi \cdot G_{\text{гр}} \cdot h_{\text{уш}} \cdot (r_{\text{сдв.}} - r_{\text{уш}})$, а коэффициент его жесткости при сдвиге – равенством: $C_{\text{сдв}} = C_{\text{гр}} \cdot A_{\text{ср}} / (r_{\text{сдв.}} - r_{\text{уш}}) = \pi \cdot G_{\text{гр}} \cdot h_{\text{гр}} = 3,14 \cdot G_{\text{гр}} \cdot h_{\text{уш.}}$

В дальнейшем расчете вертикальной осадки слой уплотненного грунта вокруг уширения можно не учитывать, поскольку в сравнении с величиной $l_{\text{сдв.}}$, в основном определяющей жесткость грунта, препятствующего осадке по боковой поверхности уширения, он незначителен. Аналогично и при определении сжатия грунта под свайей, поскольку $l_{\text{сдв.}} \ll h$.

Можно также оценить реальную роль трения по длине свай с ролью концевых уширений, если сравнить ее осадку с осадкой обычной сваи аналогичной длины и при одинаковой нагрузке, например, предельной для обычной сваи.

С увеличением осадки отпорность обычной сваи возрастает за счет сил трения по длине свай, а при осадке свай с уширением, благодаря высокой жесткости самого уширения, не возникнут существенные силы, удерживающие сваю в грунте за счет трения между ними.

Подтверждение этому можно увидеть на рисунке 2, где $P_2 / P_1 \ll 1$. Величины P_1 и P_2 соответствуют силам в сваях обычной и с уширением при одинаковых их осадках.

При определении полученной оценки следует иметь в виду, что силы трения в обычной свае существенно превышают поддержку ее по нижнему концу, в чем можно убедиться по данным работы [2], где для свай длиной в 11 м и 16 м отношение $N_{\text{к}} / F_{\text{тр}}$ составляет небольшую величину, в силу чего отпором грунта $N_{\text{к}}$ можно пренебречь. Ситуация иная в свае с уширениями, что следует из рисунка 2, это объясняется, во-первых, существенным отпором уширений, во-вторых, уменьшением длины свай, в силу чего снижается величина $F_{\text{тр}}$ в сравнении с $N_{\text{к}}$, наблюдается ее уменьшение. Эти обстоятельства позволяют у свай с уширениями трение по боковой поверхности свай не учитывать как незначительное.

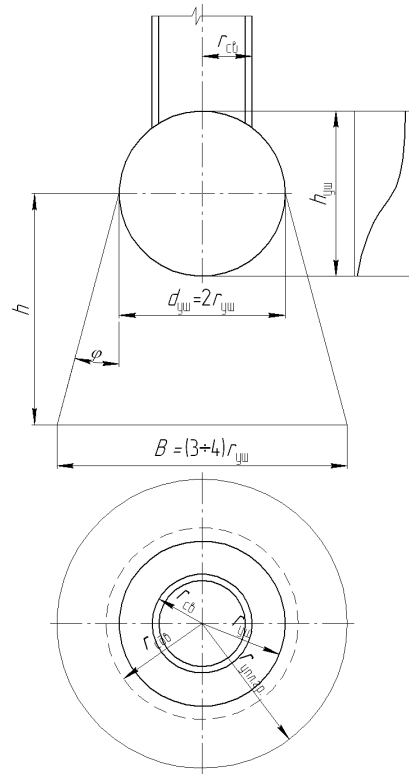


Рисунок 1 – Массив грунта, вовлекаемый свай с концевым уширением в совместную с ней работу

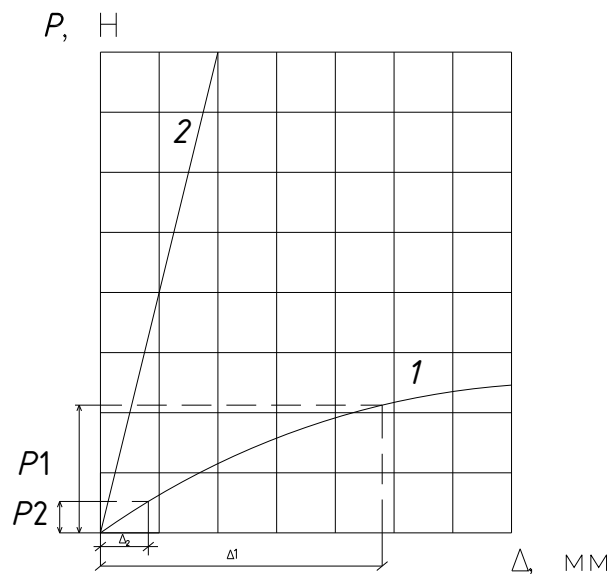


Рисунок 2 – Сравнение величин осадки Δ и сил P в обычной и с уширениями свай:
 Δ – осадка свай, соответствующая расчетной для обычной сваи нагрузке $P = P_I$

В расчете влияние сжатия грунта под свай на его жесткость примем расчетную высоту сжимаемого слоя h как расстояние между уширением с площадью $d_{уш}^2$ или для круглого сечения сваи ($\pi r_{уш}^2$) и основанием усеченной призмы с площадью в десять раз большей $10 \pi r_{уш}^2$, с наклоном грани под углом внутреннего трения ϕ . Средняя по высоте площадь сжимаемого грунта $A_{ср} = \pi r_{уш}^2 (1+10)/2$, коэффициент жесткости грунта на сжатие:

$$C_{сж} = E_{гр} \cdot A_{ср} / h = E_{гр} \cdot 11 \pi r_{уш}^2 / 2 h.$$

Может вводиться коэффициент $K > 1$, характеризующий увеличение плотности грунта за счет его уплотнения погружаемой свай.

$$\text{Имеем } C_{сж} = 11 \cdot K \cdot E_{гр} \cdot \pi r_{уш}^2 / 2 h.$$

Суммарная жесткость грунта по отношению к свае равна $C_{\Sigma} = C_{\text{сдв}} + C_{\text{сж}}$. Осадка сваи с уширением определяется равенством $V = P/C_{\Sigma}$, причем на силу трения приходится $P_{\text{тр}} = C_{\text{сдв}} V$, на сжатие грунта под уширением $P_{\text{сж}} = C_{\text{сж}} V$.

Вычислим осадку V по приведенной схеме.

Для песчаного грунта ($E_{\text{гр}} = 0,5$ МПа·м) при $l_{\text{св}} = 60$ см, $h = 1,15 \cdot R \cdot \text{ctg}(\varphi = 30^\circ) = 1,15 \cdot 0,135 \cdot 1,732 = 0,697$ м;

$C_{\text{сж}} = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,135^2 / 2 \cdot 0,697 = 0,00392$ МПа·м;

$C_{\text{сдв}} = 3,14 \cdot 0,03 \cdot 0,5 \cdot 0,6 = 0,28$ МПа·м;

$C_{\Sigma} = 0,28 + 0,00392 = 0,28392$ МПа·м.

Результат вычисления осадки сваи V , полученной теоретическим путем, представлен на графике (рисунок 3).

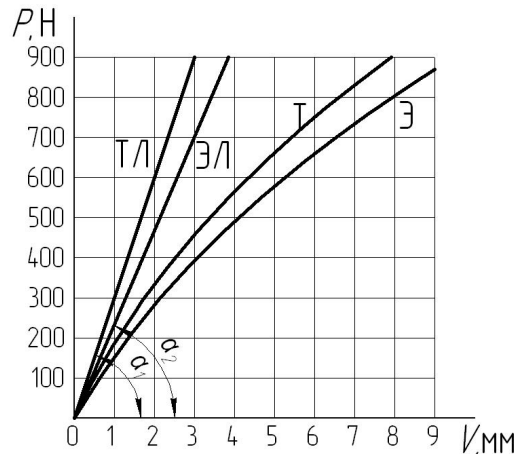


Рисунок 3 – Зависимость осадки модели сваи с концевым уширением от действующей на нее вертикальной нагрузки: т – теоретическое решение; э – экспериментальное; тл – теоретическое линейное; эл – экспериментальное линейное

Чтобы учесть пластическую работу сваи, формула, описывающая ее осадку, была видоизменена введением в знаменателе, как это было сделано в работе [2], компенсирующего коэффициента $R = (1 - aP/P_{\text{пр}})$, где a – эмпирический коэффициент, $a < 1$; $P_{\text{пр}}$ – предельное для грунта значение нагрузки. Имеем $V = P/C_{\Sigma}^3 (1 - aP/P_{\text{пр}})$. Предельная нагрузка на модель сваи:

$P_{\text{пр}} = 750$ Н, где $C_{\Sigma}^3 = P/V = \text{tg } \alpha$, $\alpha_1 = 71^\circ$, $\alpha_2 = 69^\circ$.

Экспериментальные данные по поведению сваи с уширением под ее нижним концом были сопоставлены с теоретическим решением (см. рисунок 3).

Исследование показало, что результаты расчета и эксперимента дают близкие значения, причем отклонение графика «нагрузка-деформация» несущественно отличается от линейного на широком диапазоне деформирования.

Для расчета горизонтального перемещения сваи (аналогично с балкой) используется понятие коэффициента постели K_0 , представляющего собой силу, способную кубик в 1 см^3 вдавить в грунт на 1 см. Если K_0 умножить на ширину сваи, т.е. принять $K = K_0 B$, то получим балочный коэффициент постели, т.е. силу, которая вдавливают на 1 см в грунт пластину размером $B \cdot 1 \text{ (см}^2\text{)}$, где B – ширина балки.

Коэффициент постели – интегральная характеристика отпора грунта по отношению к свае. Если его заменить упругими опорами, расставленными дискретно с шагом a , то их коэффициент жесткости будет равен:

$$C = K \cdot a = K_0 B \cdot a. \quad (1)$$

Расчетная схема свайной опоры представляется как многопролетный стержень, опирающийся на упругие опоры, моделирующие грунт основания в конечном числе точек.

Каждая упругая опора характеризует жесткость примыкающего к ней участка грунта. Для сравнения практических и теоретических данных представим модель сваи длиной 60 см с уширением, опирающейся на 5 упругих опор с шагом 15 см (рисунок 4). Свая загружалась го-

горизонтальной нагрузкой через блок, закрепленный к лотку с мелкозернистым песком. Результаты испытания модели сваи на горизонтальную силу представлены в таблице 1.

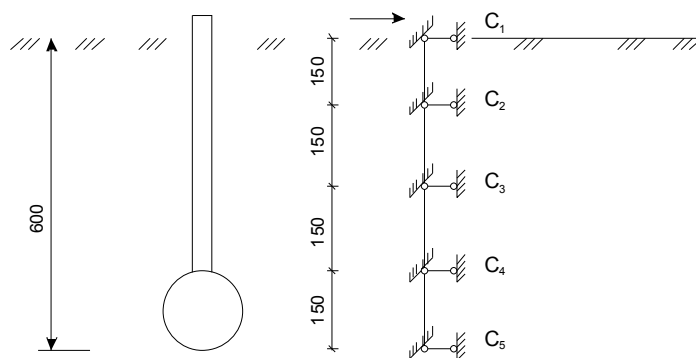


Рисунок 4 – Расчетная схема сваи с концевым уширением

Таблица 1 – Результаты перемещений сваи от горизонтальной нагрузки

№ п/п	P , Н	$V_{\text{эксперим.}}$, мм	$V_{\text{теоретич.}}$, мм (предлагаемая методика).	$V_{\text{теоретич.}}$, мм (программа БУ-2)
1	200	1,1	1,2	1,198
2	300	1,5	1,7	1,688
3	500	2,5	2,6	2,59
4	800	3,5	3,4	3,18
5	1000	3,8	3,93	3,84

Перейдем к расчету сваи с уширением под нижним ее концом.

В общем виде система уравнений равновесия усилий, учитывающая деформации изгиба и сдвига поперечных сечений, для k -й расчетной точки сваи, разделенной на i участков и состоящей из n связей, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\frac{12E_i I_i}{s_i^3} \Theta_i V_{k-1} - \frac{6E_i I_i}{s_i^2} \Theta_i \varphi_{k-1} + \left(\frac{12E_i I_i}{s_i^3} \Theta_i + \frac{12E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}^3} \Theta_{i+1} + C_{V,k} \right) V_k + \\ & + \left(\frac{6E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}^2} \Theta_{i+1} - \frac{6E_i I_i}{s_i^2} \Theta_i \right) \varphi_k - \frac{12E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}^3} \Theta_{i+1} V_{k+1} + \frac{6E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}^2} \Theta_{i+1} \varphi_{k+1} = P_k, \\ & \frac{6E_i I_i}{s_i^2} \Theta_i V_{k-1} + \frac{E_i I_i}{s_i} (3\Theta_i - 1) \varphi_{k-1} + \left(\frac{6E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}^2} \Theta_{i+1} - \frac{6E_i I_i}{s_i^2} \Theta_i \right) V_k + \\ & + \left(\frac{E_i I_i}{s_i} (3\Theta_i + 1) + \frac{E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}} (3\Theta_{i+1} + 1) + C_{\varphi,k} \right) \varphi_k - \frac{6E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}^3} \Theta_{i+1} V_{k+1} + \frac{E_{i+1} I_{i+1}}{s_{i+1}} (3\Theta_{i+1} - \\ & - 1) \varphi_{k+1} = M_k, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где E_i , I_i – модуль упругости и момент инерции рассматриваемого i -го участка балки длиной s_i ; V_k , φ_k – соответственно смещение и поворот k -й точки; P_k , M_k – поперечная сила и момент в k -й точке; Θ_i – коэффициент, учитывающий влияние сдвига, определяемый по формуле:

$$\Theta_i = 1 / (1 + 12E_i I_i \eta / G_i A_i s_i^2),$$

где G_i – модуль сдвига i -го участка сваи; A_i – площадь поперечного сечения сваи; η – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по высоте поперечного сечения балки; $C_{V,k}$ и $C_{\varphi,k}$ – жесткость основания в k -й точке балки.

$K_0 = 8 \cdot 10^4 \text{ кН/м}^3$ для мелких песков средней плотности.

Изгибная и сдвиговая жесткость поперечного сечения сваи:

$$EJ_{сеч} = EJ_{дер.сваи} + EJ_{мет.трубки} = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,44 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-4} = 3000 \text{ кН} \cdot \text{м}^2;$$

$$GA_{сеч} = 0,039 \cdot 0,037^2 \cdot 10^4 + 0,314 \cdot 0,135^2 / 4 \cdot 2 \cdot 10^6 = 28613,78 \text{ кН}.$$

Получив коэффициенты жесткости упругих опор по формуле и введя данные в программу ЭВМ БУ-2 «Расчет балок и свай на упругом основании» (разработана в АИСИ), получаем значения линейных и угловых перемещений в пяти опорах сваи с уширением (см. таблицу 1). Разработанная методика расчета показала достаточно хорошее совпадение с результатами лабораторных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, В.С. Конструктивные решения свайных фундаментов с поверхностными и концевыми уширениями для структурно-неустойчивых оснований [Текст] / В.С. Федоров, Н.В. Купчикова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №1. – С. 88-91.
2. Сапожников, А.И. Модель и эффективные расчетные схемы грунтового полупространства [Текст] / А.И. Сапожников // Изв. вузов. Сер. Строительство. – М.: 1996. – Вып. 4. – С. 26-31.

Купчикова Наталья Викторовна

Астраханский архитектурно-строительный институт

Кандидат технических наук, доцент

Тел.: +7 (4862) 76-03-72

E-mail: oantc@mail.ru

KUPCHIKOVA N.V.

DEFORMATION CALCULATION OF THE PILES STRENGTHENED BY CEMENTATION OF THE GROUND UNDER ITS BOTTOM END AT VERTICAL AND HORIZONTAL LOADING

It is considered physical and mathematical models of power interoperability of piles with trailer widens with the soil basis. The assessment of influence of friction on length of a pile with widen on bearing capacity is given. The deformation method of calculation of piles is adapted for a deformation assessment of piles with trailer widens. Comparisons of results of calculation by the developed technique with experimental data (laboratory researches) are resulted. The spent comparison has shown good enough coincidence of results.

Keywords: piles, trailer widen, rigidity, factor lay.

BIBLIOGRAPHY

1. Fedorov, V.S. Konstruktivnye resheniya svajnyh fundamentov s poverhnostnymi i koncevymi ushi-renijami dlja strukturno-neustojchivyh osnovanij [Tekst] / V.S. Fedorov, N.V. Kupchikova // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2011. – №1. – С. 88-91.
2. Sapozhnikov, A.I. Model' i jeffektivnye raschjotnye shemy gruntovogo poluprostranstva [Tekst] / A.I. Sapozhnikov // Izv. vuzov. Ser. Stroitel'stvo. – М.: 1996. – Vyp. 4. – С. 26-31.

Kupchikova Natalia Viktorovna

Astrakhan architecturally-building college

Candidate of technical science, associate professor

Тел.: +7 (4862) 76-03-72

E-mail: oantc@mail.ru

ТРОИЦКАЯ С.Е.

ПРИОРИТЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «АКТИВНОЙ» ПОРИСТОСТИ ПРИ ПРОГНОЗЕ ОСАДКИ СЛАБЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Расчет осадки инженерных сооружений до настоящего времени является одной из сложных задач. Повышение точности прогноза осадки зависит от правильного и полного учета физико-механического процесса, происходящего при статическом уплотнении. Проведенный анализ влияния различных факторов на закономерности осадки слабых грунтов показал, что требуется учет работающей пористости, а не полной («геометрической»). Обработка результатов компрессионно-консолидационных испытаний по специальной методике нескольких разновидностей минеральных, органоминеральных и органических грунтов подтвердила необходимость оценки «активной» пористости грунта в основании при расчете его деформации под нагрузкой от веса сооружения.

Ключевые слова: осадка, грунт, нагрузка, плотность, «активная» пористость, поровая вода.

Прогноз осадки является одной из сложных задач при проектировании инженерных сооружений. Существенная разница в величинах фактической и расчетной осадки инженерных сооружений, особенно в сложных природно-климатических и грунтово-геологических условиях, заставляет ученых еще раз возвращаться к исследованию поведения грунтов и методам прогноза их деформаций.

Грунты в современном строительстве используются в качестве основания инженерных сооружений, материала для строительства, среды для размещения сооружений. В действующих нормах по проектированию [1-4] в указанных случаях предлагается проводить индивидуальный совместный расчет сооружения и его основания по предельным состояниям. При этом прогноз осадок делится на две части:

- первая связана с расчетом сжимающих напряжений по формулам теории упругости как в линейно-деформируемой среде;
- вторая – с расчетом осадки, исходя из модуля деформации при линеаризации компрессионного графика в заданном интервале нагрузки.

Прогнозирование протекания осадки даже при таком подходе осложняется необходимостью учета целого ряда факторов: размеров сооружения, режима нагружения, неоднородности строения грунтовой толщи, особенностей механических свойств грунтов и их анизотропии. Очевидно, что достоверный и комплексный учет перечисленных и других возможных факторов может быть осуществлен только на основе глубокого анализа физико-механических процессов, происходящих в грунте в зоне воздействия сооружения, и при минимальном упрощении влияния этих процессов в формульных выражениях. Использование огромных возможностей математического моделирования, современного программного обеспечения, автоматизации расчетов и других современных средств не может компенсировать недоучет истинных изменений состояния и свойств грунтов под нагрузкой от веса сооружения.

Как известно, сжатие водонасыщенного грунта происходит в основном за счет отжатия поровой воды и сопровождается уменьшением его пористости. Напомним, что часть от общего объема пор, которая формирует путь фильтрации отжимаемой поровой воды из слоя (образца) при его статическом уплотнении, понимается под «активной» пористостью. Кроме того, с точки зрения геометрии по Ларионову А.К. за «активную» пористость, выраженную в процентах от общей пористости, принимаются поры размером более 0,02 мм, «пассивную» пористость представляют поры размером менее 0,02 мм. В зависимости от соотношения внутренних (структура грунта, его природная влажность) и внешних факторов (величина внешней нагрузки, скорость ее приложения) отжимается только определенный объем воды. Это связано

с тем, что не все поры в грунте открыты и гидравлически связаны между собой, а имеются замкнутые поры. Причем в процессе статического уплотнения под нагрузками от веса сооружения отжимается вода только определенного вида – свободная и рыхлосвязанная. Поэтому при расчетах осадок (конечной и во времени) следует осторожно использовать чисто «геометрическую» пористость. В свое время понятия «активная» и «пассивная» пористость были детально изучены А.К. Ларионовым. Им же даны конкретные понятия «гидравлически активной пористости» и «частичной активной пористости» и разработаны методики их определения для решения частных инженерных задач [5].

Объемы жидкой и твердой фаз рассчитываются по формулам первого закона механики грунтов с использованием плотности частиц грунта. Однако эти формулы не совсем удобны для вычислений изменения объема грунта при уменьшении его пористости из-за того, что сама пористость отнесена ко всему объему грунта, который изменяется в процессе уплотнения под нагрузкой. В связи с этим Н.М. Герсевич и Н.А. Цытович на основании того же закона механики грунтов предложили использовать «коэффициент пористости» для решения инженерных задач гражданского строительства. Аналогичное предложение дал Г.М. Шахунянц для решения задач транспортного строительства:

$$e = \frac{n}{m}, \quad (1)$$

где n – объем пор в единице объема грунта; m – объем твердых частиц в единице объема грунта, вычисляемый по формуле:

$$m = \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (2)$$

где ρ_d – плотность скелета грунта; ρ_s – плотность частиц грунта.

Так как $n = 1 - m$, то формула для расчета коэффициента пористости принимает вид:

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}. \quad (3)$$

Величины n и m представляют собой геометрические объемы для данного вида грунта и его состояния. Значит по формулам (1) и (3) рассчитывается коэффициент «геометрической» пористости грунта.

Для решения задач по прогнозу осадки слабого основания автор впервые предлагает ориентироваться не на «геометрическую» пористость, а на «активную» пористость грунта. Для подтверждения правильности данного предложения (путем сопоставления величин коэффициентов «активной» и «геометрической» пористости грунта одной разновидности с соответствующими ему физико-механическими свойствами и уплотняемого под одной величиной нагрузки) была проведена серия компрессионных испытаний. Испытывались минеральные, органоминеральные и органические грунты. В качестве примера из многочисленных экспериментов приведены результаты сравнительных испытаний грунтов двух разновидностей: суглинка легкого пылеватого тугопластичной консистенции и торфа сильноразложившегося маловлажного. Физико-механические характеристики грунтов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунтов

Разновидность грунта	Природная влажность, W_0 , %	Плотность, ρ , г/см ³	Плотность частиц грунта, ρ_s , г/см ³	Плотность сухого грунта, ρ_d , г/см ³	Коэффициент пористости, e	Пористость, n , %
Суглинок легкий пылеватый	29	1,9	2,7	1,47	0,84	45,6
Торф сильно-разложившийся	33	0,6	1,39	0,139	9,0	90

Здесь объем грунта уменьшается за счет оттока поровой воды через открытые и непрерывно связанные поры. Поэтому коэффициент «активной» пористости, соответствующий i -ой ступени нагрузки, рассчитан по общеизвестной в механике грунтов формуле через относительную деформацию (осадку) образца грунта:

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta h_i}{h}, \quad (4)$$

где e_0 – коэффициент пористости грунта до деформации образца; Δh_i – абсолютная деформация образца грунта под i -ой ступенью нагрузки; h – начальная высота образца.

Коэффициент «геометрической» пористости, соответствующий i -ой ступени нагрузки, рассчитан по формуле (3).

В ходе испытаний после стабилизации деформации образцов указанных грунтов под каждой ступенью нагрузки проводилось их контрольное взвешивание и вычислялись их объемы. По этим данным рассчитывалась плотность скелета грунта после каждой ступени нагрузки по формуле:

$$\rho_d = \frac{m_i}{V_i}, \quad (5)$$

где m_i – масса сухого грунта, соответствующая i -ой ступени нагрузки; V_i – объем всего грунта, соответствующий i -ой ступени нагрузки.

В таблице 2 приведены полученные результаты.

Таблица 2 – Результаты компрессионных испытаний

Разновидность грунта	Величина нагрузки, P , МПа	Относительная деформация, ε	Плотность сухого грунта, ρ_d , г/см ³	Коэффициент «геометрической» пористости, e^{geom}	Коэффициент «активной» пористости, e^{akt}
Суглинок	0,05	0,047	1,543	0,754	0,75
	0,1	0,06	1,565	0,73	0,725
	0,2	0,083	1,59	0,698	0,687
Торф	0,025	0,25	0,15	8,3	6,5
	0,075	0,46	0,18	6,72	4,4
	0,125	0,55	0,2	5,95	3,5
	0,150	0,578	0,22	5,3	3,22

Компрессионные кривые суглинка (рисунок 1), соответствующие значениям коэффициентов «активной» и «геометрической» пористостей, почти совпадают, т.е. коэффициенты «активной» и «геометрической» пористостей практически близки. Анализируя компрессионные кривые торфа (рисунок 2), можно заключить, что значения коэффициентов «активной» и «геометрической» пористостей под одной и той же нагрузкой существенно отличаются, разница составляет более 25%.

Подобный характер отклонений получен и для органоминеральных грунтов.

Таким образом, численный анализ соотношений «геометрической» и «активной» пористости указанных грунтов показал, что у минеральных грунтов (суглинка) коэффициенты геометрической и активной пористости в течение опыта и после него практически совпадают, у органических (торф) имеют место существенные отклонения между значениями геометрической и активной пористости.

Это связано с особенностью структур минеральных и органических грунтов. Первые обладают упорядоченной структурой, имеют по сравнению со вторыми более прочные структурные связи и значительно меньшую пористость. При этом как в органических, так и в минеральных грунтах поры распределены беспорядочно и обладают различной формой и размерами. Однако поровое пространство торфа значительно больше и имеет более сложную геометрию.

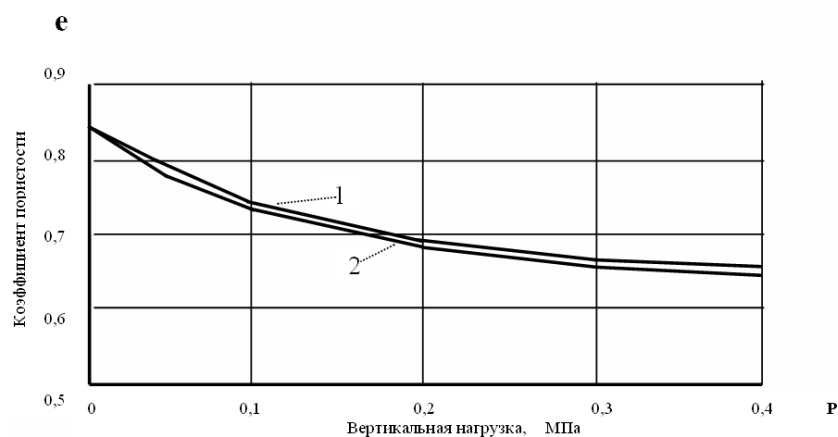


Рисунок 1 – Компрессионные кривые суглинка легкого пылеватого: 1 – кривая коэффициентов «геометрической» пористости; 2 – кривая коэффициентов «активной» пористости

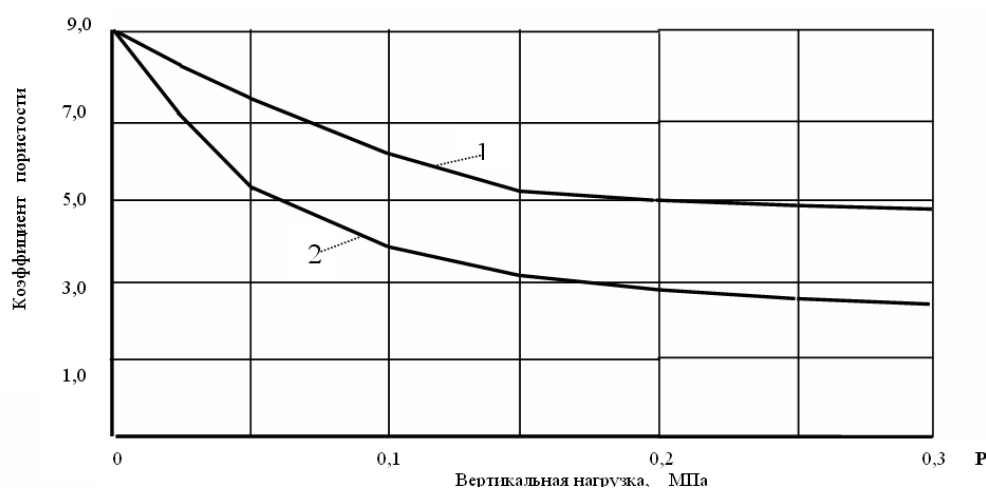


Рисунок 2 – Компрессионные кривые торфа: 1 – кривая коэффициентов «геометрической» пористости; 2 – кривая коэффициентов «активной» пористости

Следовательно, для минеральных грунтов справедливы все формулы, вытекающие из 1-го закона механики грунтов, в том числе и формула (3). Для органических грунтов при прогнозе осадки следует использовать коэффициент пористости, рассчитанный по формуле (4).

Ранее автор вносила предложения по усовершенствованию методики компрессионно-консолидационных испытаний грунтов, часть которых изложена в [6, 7]. Предложения, изложенные выше, могут быть учтены в дальнейшем.

Таким образом, последующее изучение физической сущности статического уплотнения слабых грунтов позволило трансформировать основные понятия прикладной механики грунтов на поведение слабых грунтов, особенно органических и органоминеральных. Предлагаемый подход, несомненно, повышает точность прогноза осадки инженерных сооружений на указанных грунтах, что позволяет повысить точность назначения конструкции и дополнительных мероприятий.

Вполне очевидно, что повышение надежности проектирования инженерных сооружений в сложных природных условиях повышает качество самого строительства с обеспечением требуемых эксплуатационных показателей в заданные сроки службы сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений [Текст].
2. СНиП 32.01-85 Железные дороги [Текст].
3. СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги [Текст].

4. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах [Текст]. – М.: Информавтодор, 2004.
5. Ларионов, А.К. Методы исследования структуры грунтов [Текст] / А.К. Ларионов. – М.: Недра, 1971 – 200 с.
6. Кузахметова, Э.К. Проект стандарта на определение характеристики сжимаемости грунтов [Текст] / Э.К. Кузахметова, Т.Н. Ибрагимова, С.Е. Троицкая // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – №3.
7. Кузахметова, Э.К. Методология оценки состояния земляного полотна при реконструкции и ремонте автомобильных дорог в сложных природных условиях: монография [Текст] / Э.К. Кузахметова, В.В. Савицкий, С.Е. Троицкая. – Балашиха, 2010. – 157 с.

Троицкая Светлана Евгеньевна

Военно-технический университет, Московская обл., г. Балашиха
Старший преподаватель кафедры «Общетехнические дисциплины»
Тел.: +7-963-603-88-79

TROITSKAJA S.E.

PRIORITY OF USING THE «ACTIVE» POROSITY FOR FORECASTING THE SETTLEMENT OF WEAK SOILS IN FOUNDATIONS OF ENGINEERING STRUCTURES

Calculation of the settlement of engineering structures is up to now one of the complicated problems. Increasing the precision of settlement forecasting depends on perfect and complete account of physical-mechanical processes occurring under statical compaction. Analysis conducted of the influence of various factors on regularity of the settlement of weak soils showed that the account of «active» porosity rather than of complete («geometric») one is required. The treatment of results of compression-consolidation tests according to certain methods of several types of mineral, organomineral and organic soils confirmed the necessity of evaluation of «active» porosity of the soil in the foundation during calculation its deformation under load due to the weight of the structure.

Keywords: settlement, soil, load, density, «active» porosity, porous water.

BIBLIOGRAPHY

1. SNiP 2.02.01-83* Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij [Tekst].
2. SNiP 32.01-85 Zheleznnye dorogi [Tekst].
3. SNiP 2.05.02-85* Avtomobil'nye dorogi [Tekst].
4. Posobie po proektirovaniyu zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog na slabyh gruntah [Tekst]. – М.: Informavtodor, 2004.
5. Larionov, A.K. Metody issledovaniya struktury gruntov [Tekst] / A.K. Larionov. – М.: Nedra, 1971 – 200 s.
6. Kuzahmetova, Je.K. Proektt standart na opredelenie harakteristiki szhimaemosti gruntov [Tekst] / Je.K. Kuzahmetova, T.N. Ibragimova, S.E. Troickaja // Nauka i tehnik v dorozhnoj otrasli. – 2008. – №3.
7. Kuzahmetova, Je.K. Metodologiya ocenki sostojaniya zemljanogo polotna pri rekonstrukcii i remonte avtomobil'nyh dorog v slozhnyh prirodnyh usloviyah: monografija [Tekst] / Je.K. Kuzahmetova, V.V. Savickij, S.E. Troickaja. – Balashiha, 2010. – 157 s.

Troitskaja Svetlana Evgenevna

Military-technical university, Balashiha
Lecturer of sub-faculty «Pantotechnical studies»
Ph.: +7-963-603-88-79

ТУРКОВ А.В., МАРФИН К.В.

ПРОГИБЫ И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВНЫХ КВАДРАТНЫХ ИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТИН С РАЗЛИЧНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЖЕСТКОСТИ СВЯЗЕЙ СДВИГА

Рассматривается взаимосвязь основной частоты свободных поперечных колебаний ω двухслойных изотропных квадратных пластин в ненагруженном состоянии и их максимальных прогибов W_0 при действии равномерно распределенной нагрузки в зависимости от граничных условий слоев и жесткости связей сдвига. Разработана конечно-элементная схема двухслойной пластины. Построены кривые «Прогиб – жесткость связей сдвига» и «Частота поперечных колебаний – жесткость связей сдвига». Показано, что для составных пластинок квадратного очертания с различными граничными условиями слоев коэффициент K с точностью до 3,05% совпадает с аналогичным коэффициентом для квадратных пластин цельного сечения.

Ключевые слова: составная пластина, связи сдвига, поперечные связи, частота собственных колебаний, максимальный прогиб.

В современном строительстве немалую роль играет не только качество новой продукции, но и оценка несущей способности и жесткости уже существующих конструкций. Последнее десятилетие интенсивно стали развиваться динамические методы диагностики и оценки качества строительных конструкций. Это связано с обнаружением профессором В.И. Коробко нескольких фундаментальных закономерностей в строительной механике, в основе которых лежат строгие функциональные взаимосвязи между интегральными физическими параметрами строительных конструкций, в частности, между максимальным прогибом нагруженных конструкций в виде балок и пластинок и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии. Однако, в отличие от изотропных пластин цельного сечения, для составных пластин эта закономерность еще не подтверждена. Решение данной проблемы имеет не только научное, но и практическое значение.

В работе [1] профессор В.И. Коробко вывел фундаментальную зависимость для изотропных пластин постоянного сечения, которая гласит: вне зависимости от граничных условий произведение максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределенной нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний балки в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/t есть величина постоянная и соответствует закономерности:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{t}, \quad (1)$$

где t – равномерно распределенная по площади масса пластины.

В работе [2] выведены основные уравнения для составных стержней и пластин с упругоподатливыми поперечными связями и связями сдвига. Чтобы подтвердить закономерность (1) для составных пластин, были проведены численные исследования квадратной составной двухслойной пластины при различных граничных условиях.

В качестве расчетной конструкции была принята квадратная пластина со стороной $a \times b = 1000 \times 1000$ мм (рисунок 1). Оба слоя разбивались на 400 конечных элементов. Поперечные связи и связи сдвига вводились в узлы конструкции (рисунок 2). Было рассмотрено два условия закрепления пластин по контуру: шарнирное опирание и жесткое защемление (рисунок 3). Опоры по контуру плиты располагались в узлах конечных элементов конструкции, при этом граничные условия слоев были одинаковыми. Слои составной пластинки приняты постоянного сечения толщиной $\delta = 8$ мм из древесно-стружечной плиты, жесткость поперечных связей постоянна и составляет $EA_c = 8^3$ кН. Все характеристики слоев взяты из паспорта изделия: толщина $\delta = 8$ мм, средняя плотность $\rho = 740$ кг/м³, модуль упругости при изгибе $E = 260000$ МПа. Для ди-

намического расчета массы в узлах собирались в соответствии с объемным весом и грузовой площадью узла. При статическом расчете к верхнему слою прикладывалась равномерно распределенная нагрузка интенсивностью 1 кН/м^2 . Исследования проводились методом конечных элементов. Расстояние между слоями принималось равным расстоянию между их центрами тяжести слоев.

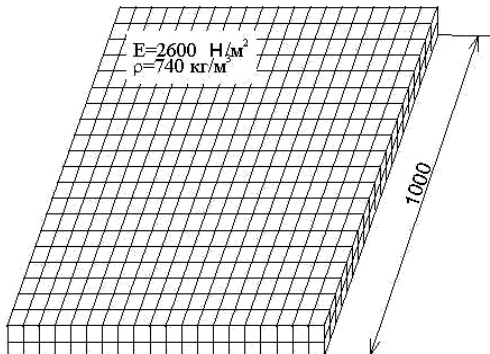


Рисунок 1 – Разбивка составной квадратной пластины на конечные элементы

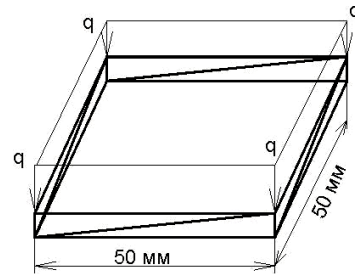


Рисунок 2 – Конечные элементы пластины с поперечными связями и связями сдвига

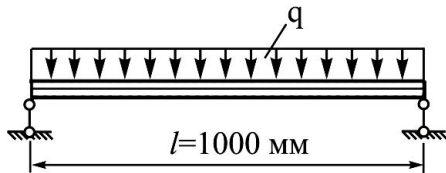


Рисунок 3 – Расчетные схемы шарнирно опертой и защемленной по контуру составной пластины

Расчет выполнялся в программном комплексе SCAD. В результате расчета определялся максимальный прогиб и частота основного тона поперечных колебаний. Результаты расчета шарнирно опертой пластины приведены в таблице 1. По данным таблицы 1 построены графики изменения прогибов и частот колебаний и коэффициента k в зависимости от жесткости связей сдвига $EA_{сдв}$ (рисунки 4 и 5).

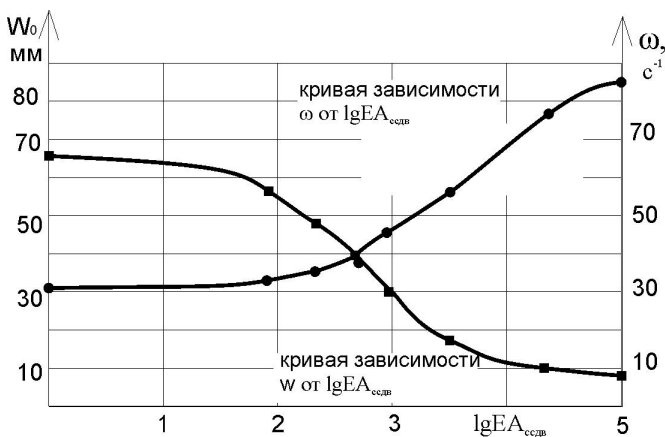


Рисунок 4 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов в зависимости от жесткости связей сдвига при шарнирном опирании по контуру

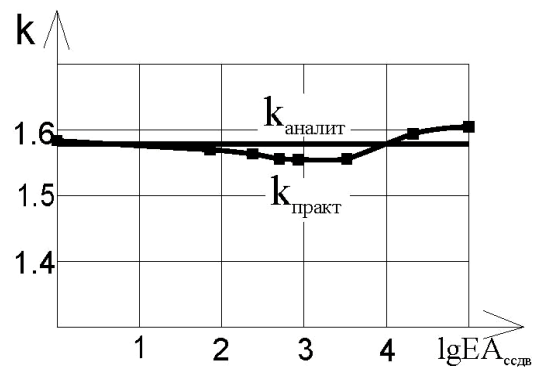
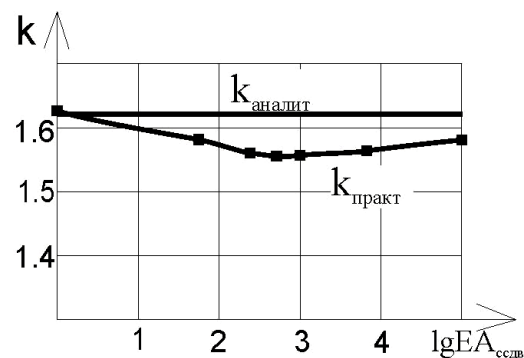
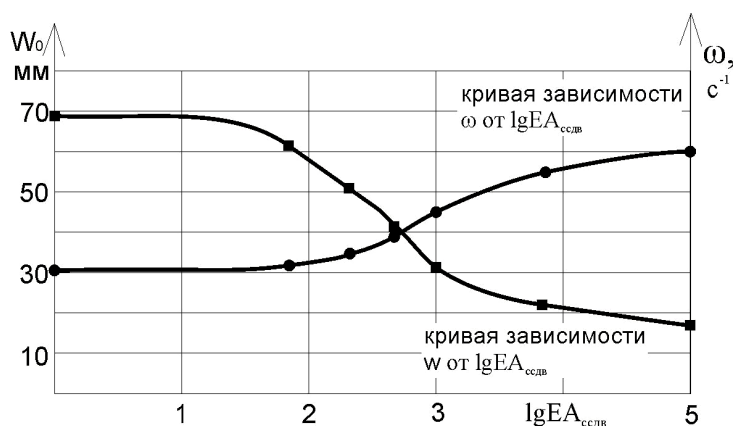


Рисунок 5 – Изменение коэффициента k в зависимости от жесткости связей сдвига при шарнирном опирании по контуру

Результаты расчета жестко защемленной по контуру пластины приведены в таблице 2. По данным таблицы 2 построены графики изменения прогибов и частот колебаний и коэффициента k в зависимости от жесткости связей сдвига $EA_{сдв}$ (рисунки 6 и 7).

Таблица 1 – Результаты численных исследований составной квадратной пластины размером $a \times b = 1000 \times 1000$ мм, шарнирно опертой по контуру

№ п/п	$\lg EA_{\text{сдв}}$	Круговая частота основного тона, ω (с ⁻¹)	Максимальный про- гиб, W_0 (мм)	Круговая частота основного тона, вы- численная аналити- ческим методом, ω (с ⁻¹)	Максимальный про- гиб, вычисленный аналитическим ме- тодом, W_0 (мм)	$K = W_0 \omega^2 / (q/m)$	$K_{\text{аналит}} = W_0 \omega^2 / (q/m)$ на основе аналити- ческих W и ω	Отклонение K от Каналит (%)
1	0	30,557	68,376	30,518	68,289	1,584304	1,582	-0,15
2	0,5	30,589	68,231			1,584257		-0,14
3	0,8	30,716	67,658			1,584024		-0,13
4	1	30,841	67,098			1,583725		-0,11
5	1,6	31,739	63,285			1,581978		0,00
6	2	33,343	57,228			1,578815		0,20
7	2,3	35,599	50,07			1,574586		0,47
8	2,5	37,491	45,048			1,571241		0,68
9	2,7	40,578	38,34			1,566559		0,98
10	2,9	44,159	32,289			1,562451		1,24
11	3	46,113	29,583			1,560998		1,33
12	3,3	53,164	22,251			1,560624		1,35
13	3,5	57,84	18,8434			1,564333		1,12
14	3,8	66,136	14,525			1,576541		0,35
15	4	71,846	12,39			1,587047		-0,32
16	4,3	78,181	10,538			1,598358		-1,03
17	4,5	80,976	9,849			1,602574		-1,30
18	4,6	82,567	9,485			1,604588		-1,43
19	5	85,888	8,784	85,779	8,643	1,607943		-1,64



Анализ данных показывает, что независимо от жесткости шва в составе пластин фундаментальная зависимость (1) выполняется. Можно сделать предположение, что при разбиении пластин на более мелкие конечные элементы разница между теоретическими и численными данными уменьшится.

Таблица 2 – Результаты численных исследований составной квадратной пластины жестко заземленной по контуру

№ п/п	$\lg EA_{\text{сслв}}$	руговая частота основного тона, ω (с ⁻¹)	Максимальный прогиб, $W_{0 \text{ max}}$ (мм)	Круговая частота основного тона, вычисленная ана- литическим мето- дом, ω (с-1)	Максимальный прогиб вычислен- ный аналитиче- ским методом, $W_{0 \text{ max}}$ (мм)	$k = W_0 \omega^2 / (q/m)$	$k = W_0 \omega^2 / (q/m)$ на основе аналитиче- ских W_0 и ω	отклонение k от $k_{\text{аналит}}$ %
1	0	30,557	69,709	30,459	69,485	1,61519	1,61	-0,32
2	0,5	30,621	68,496			1,593739		1,01
3	0,8	30,716	67,863			1,588824		1,32
4	1	30,841	67,222			1,586652		1,45
5	1,6	31,737	63,326			1,582804		1,69
6	2	33,33	57,288			1,579238		1,91
7	2,3	35,54	50,246			1,574888		2,18
8	2,5	37,35	45,4			1,57163		2,38
9	2,7	40,177	39,122			1,567074		2,67
10	2,9	43,198	33,761			1,563349		2,90
11	3	44,71	31,488			1,561952		2,98
12	3,3	49,36	25,817			1,56088		3,05
13	3,5	51,815	23,455			1,562643		2,94
14	3,8	55,224	20,72			1,568046		2,61
15	4	57,053	19,468			1,572504		2,33
16	4,3	58,735	18,426			1,577387		2,03
17	4,5	59,387	18,048			1,57952		1,89
18	4,6	59,738	17,849			1,580624		1,82
19	5	60,424	17,472	61,455	17,77	1,582978		1,68

Закключение

В результате исследований подтверждена фундаментальная зависимость (1) для составных изотропных пластин на податливых связях. Результаты численных и теоретических исследований показали хорошее совпадение по коэффициенту k . Расхождение для квадратных пластин составило от 1,64% при шарнирном опирании пластины по контуру до 3,05% при жестком опирании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. Об одной «замечательной» закономерности в теории упругих пластинок [Текст] / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – №11. – С. 32-36.
2. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.

Турков Андрей Викторович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73-43-49

Марфин Кирилл Васильевич

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Инженер
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
E-mail: oante@mail.ru

TURKOV A.V., MARFIN K.V.

DEFLECTION AND NATURAL FREQUENCY COMPOSITESQUARE ISOTROPIC PLATES WITH VARIOUS BOUNDARY CONDITIONS FOR CHANGE STIFFNESS SHEAR

Examines the relationship of the fundamental frequency of free transverse vibrations ω bilayer isotropic square plates in the unloaded state and the maximum deflection W_0 in a uniformly distributed load, depending on the boundary conditions and the hardness of the layers shift linkages. Developed finite-element scheme is a two-layer plate. Curves «sag – stiffness relationship shift» and «The frequency of transverse vibrations – stiffness relationship shift». It is shown that for composite plates of square shapes with different boundary conditions to the ratio of layers up to 3,05% with the same ratio for square plates of whole cross-section.

Keywords: composite plate connection shear, cross-connection, the natural frequency of oscillation, the maximum deflection.

BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. Ob odnoj «zamechatel'noj» zakonomernosti v teorii uprugih plastinok [Tekst] / V. I. Korobko // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1989. – №11. – S. 32-36.
2. Rzhanicyn, A.R. Sostavnye sterzhni i plastinki [Tekst] / A.R. Rzhanicyn. – M.: Strojizdat, 1986. – 316 s.

Turkov Andrey Viktorovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel

Doctor of technical science, professor of department «Construction structures and materials»

Ph.: +7 (4862) 73-43-49

Marfin Kirill Vasilevich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel

Engineer

E-mail: oantc@mail.ru

УДК 536.244

ЛАДАЕВ Н.М., ГУЮМДЖЯН П.П.

**О ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКОГО
МАТЕРИАЛА УДАРОМ**

На основании экспериментальных исследований по разрушению минеральных строительных материалов в мельницах ударного типа было установлено, что измельчение зависит от вероятности разрушения. Определено, что вероятность разрушения зависит от скорости удара, механических свойств и начального размера материала. Исследования показали, что разрушение материала начинает происходить при достижении минимальной скорости, которая определяется механическими характеристиками материала и начальным размером его частицы. Показано влияние вероятности нагружения на гранулометрический состав продуктов разрушения.

Ключевые слова: вероятность разрушения, скорость удара, скорость начала разрушения, гранулометрический состав.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса разрушения как одиночных, так и коллектива частиц показали, что при высоких скоростях нагружения большинство горных пород дробятся как хрупкие. Одним из определяющих параметров, характеризующих эффективность работы машин, является конечный гранулометрический состав продукта или его удельная поверхность.

Было показано [1], что критерием для оценки измельчения материала является критическая скорость разрушения, при которой частицы монофракции после однократного ударного нагружения переходят в более тонкие классы размеров.

При ударном нагружении в материале возникают деформации и напряжения, которые в общем виде определяются равенством:

$$\sigma_{\text{ж}} = A \left(\frac{\xi}{d_{\text{н}}} \right)^n, \quad (1)$$

где ξ – деформация частицы в момент удара, м; $d_{\text{н}}$ – начальный размер частиц, м; $\sigma_{\text{ж}}$ – напряжения сжатия, Па; A – коэффициент, зависящий от свойств материала.

Уравнение (1) указывает на то, что компоненты тензора напряжения при ударе возрастают пропорционально некоторому параметру. В данном случае таким параметром является скорость частицы в момент удара о неподвижную поверхность. Скорость, при которой происходит 50% разрушение материала, многими исследователями называется критической ($V_{\text{кр}}$).

Экспериментальные исследования показывают, что при измельчении в мельницах ударного принципа действия можно получить различное распределение гранулометрического состава в зависимости от скоростей нагружения (V), исходного размера ($d_{\text{н}}$) и физических свойств самого материала.

Если рассев по плюсу ($R(d)$) изобразить в виде кривой распределения осколков, то в общем случае изменение гранулометрического состава можно представить кривой 1 и кривой 2 (рисунок 1).

Из рисунка 1 видно, что гранулометрический состав, получаемый в результате измельчения, может быть изображен кривой вида 1, когда кривая не пересекает линию 50%, а также кривой вида 2, когда пересекает линию 50%. Такое изменение гранулометрического состава (кривая 1 и кривая 2) напрямую зависит от вероятности разрушения частиц (рисунок 2).

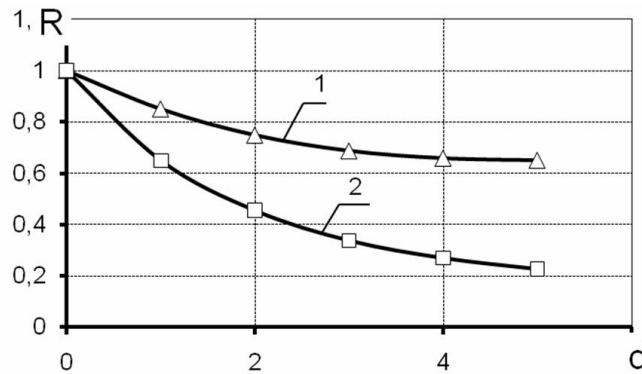


Рисунок 1 – Изменение гранулометрического состава

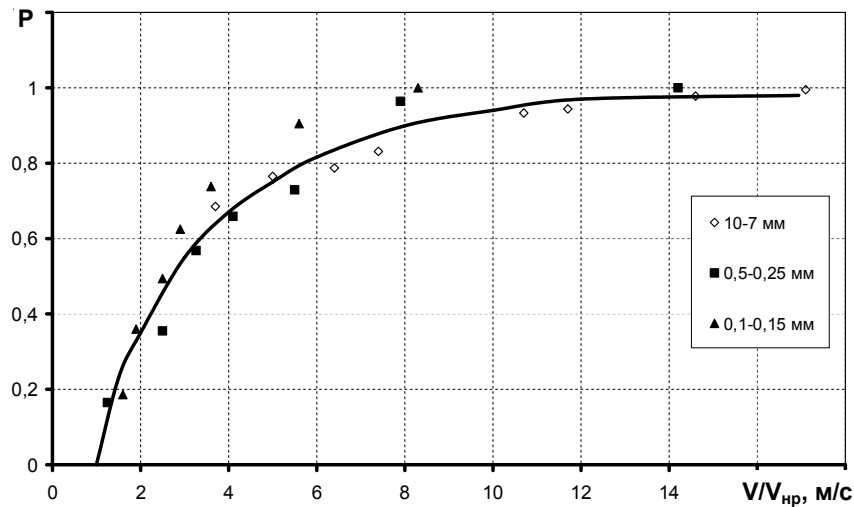


Рисунок 2 – Изменение вероятности разрушения частиц известняка от комплекса $V/V_{нр}$

Одни авторы в качестве критерия скорости дробления принимают такую скорость, при которой 50% частиц, сталкиваясь с неподвижной поверхностью, разрушаются. Такой подход объясняется тем, что прочность частиц обычно одного и того же материала при равных начальных размерах носят стохастический характер, т.е. имеется разброс по механическим характеристикам. Другие предлагают в качестве критической скорости принимать такую, при которой достигается 100% вероятность разрушения [2]. Такая вероятность достигается при очень больших скоростях нагружения (200-300 м/с), что является экономически нецелесообразным.

Используя безразмерный комплекс $V/V_{кр}$, авторы [1-2] получили уравнение для расчета вероятности разрушения, которая описывается распределением Вейбулла-Гнеденко. Это распределение по своим свойствам занимает промежуточное положение между нормальным и экспоненциальными законами.

Многочисленные исследования, проведенные нами по разрушению одиночных частиц различных материалов, показали, что в качестве безразмерного критерия можно использовать отношение $V/V_{нр}$, где V – скорость частицы в момент удара о неподвижную поверхность, м/с; $V_{нр}$ – скорость начала разрушения частицы. За начальную скорость ($V_{нр}$) следует принимать ту, при которой возникают напряжения, превышающие предел прочности материала. Используя безразмерный комплекс, было получено уравнение для определения вероятности разрушения:

$$P(x) = 1 - \exp\left(-\frac{V - V_{нр}}{V_{нр} \cdot a}\right), \quad (2)$$

где a – среднее значение или математическое ожидание величины $(V - V_{нр}/V_{нр})$, зависящее от

свойства горной породы.

Обработка результатов экспериментальных исследований позволила определить величины $V_{\text{нр}}$ и a . Среднее значение (a) зависит от свойств материала и может быть определено из эмпирического выражения:

$$a = 0,5 + 5,7(V_p \cdot 10^{-3})^{0,5}, \quad (3)$$

где V_p – скорость прохождения продольной волны для конкретного материала, м/с.

А скорость $V_{\text{нр}}$ определяется выражением:

$$V_{\text{нр}} = V_p \cdot 10^{-3} \cdot (0,9 + 2,5/d_H^{0,5}). \quad (4)$$

Уравнение (2) показывает, что вероятность разрушения любого материала при ударе изменяется пропорционально комплексу $(V - V_{\text{нр}})/V_{\text{нр}} \cdot a$. Установлено, что если этот комплекс равен 3, то вероятность разрушения составляет 95%, а дальнейшее увеличение скорости становится экономически нецелесообразным, т.к. вероятность разрушения повышается не значительно ($P_{\text{max}}=1$).

По уравнению (2) можно определить скорость 50% разрушения материала:

$$V_{50} = V_{\text{нр}} \cdot (1 + 0,693 \cdot a). \quad (5)$$

Достигая некоторого значения V , которое больше V_{50} рассчитанного по уравнению (5), можно с уверенностью сказать, что гранулометрический состав при разрушении будет соответствовать кривой 2 (рисунок 1). Если скорость V меньше значения V_{50} , определенного уравнением (5), то гранулометрический состав будет отвечать кривой 1.

Вторая кривая с вероятностью 95-90% хорошо описываются нормально-логарифмическим законом.

Таким образом, вероятность разрушения позволяет предсказать область описания гранулометрического состава нормально-логарифмическим законом. Этот закон в логарифмически вероятностной сетке изображается в виде прямой линии с углом наклона $\text{tg} = 1/\ln\sigma$, проходящей через точку с координатами $D(d) = 1 - R(d) = 50\%$ и $\ln m = \ln d_{50}$.

Величина $D(d_H)$ может быть определена из уравнения:

$$D(d_H) = \frac{100}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln\sigma} \cdot \int_0^{d_H} \exp - 0,5 \left(\frac{\ln d - \ln m}{\ln\sigma} \right)^2 \cdot d(\ln d). \quad (6)$$

В общем случае площадь под кривой, рассчитанной по уравнению (6), должна быть равна единице. В нашем случае ограничение прямой справа исходным размером приводит к «усеченному» распределению.

Обработка результатов исследований по разрушению одиночных частиц ударом показала, что ход кривой распределения зависит от вероятности разрушения. Эту зависимость можно описать уравнением в диапазоне вероятностей $0,5 \div 1$.

$$D(d_H) = 100 \cdot (1,38 - 0,4/P(x)), \quad (7)$$

где $D(d_H)$ – значение кривой распределения при начальном значении размера, %; $P(x)$ – вероятность разрушения материала исходного размера.

Таким образом, вероятность разрушения позволяет определять с достаточной точностью либо медианный размер частицы, либо дисперсию разрушаемого материала. Вводимое понятие ($V_{\text{нр}}$) не противоречит ($V_{\text{кр}}$) и более точно раскрывает физику процесса измельчения с учетом механических свойств материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуюмджян, П.П. Интенсификация процессов тонкого измельчения, механической активации твердых материалов с разработкой высокоэффективных машин и технологий для переработки отходов промышленности: дис. ... докт. техн. наук [Текст] / П.П. Гуюмджян. – Иваново. – 1989. – 403 с.
2. Партон, В.В. Механика упругопластического разрушения [Текст] / В.В. Партон, Е.М. Морозов. – М: Наука, 1974. – 416 с.

Ладаев Николай Михайлович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство строительных материалов»
Тел.: +7 (4932) 41-36-09
E-mail: k_psm@igasu.ru

Гуюмджян Перч Погосович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Доктор технических наук, профессор кафедры «Производство строительных материалов»
Тел.: +7 (4932) 41-36-09
E-mail: k_psm@igasu.ru

LADAEV N.M., GUYUMDZHYAN P.P.

**ABOUT PROBABILITY OF DESTRUCTION OF
THE FRAGILE MATERIAL IMPACT**

On the basis of experimental research on the destruction of mineral building materials in the mills impact type was found that the size depends on the probability of failure. It is determined that the probability of destruction depends on the speed of shock, mechanical properties, and the initial size of the material. Researches have shown, that the destruction of the material begins to occur at the minimum speed, which is determined by the mechanical characteristics of the material and the initial size of its particles. The influence of the probability of the particle size distribution of the products of destruction.

Keywords: *the probability of destruction, the impact velocity, the speed of the beginning of the destruction, granulometric composition.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gujumdzhan, P.P. Intensifikacija processov tonkogo izmel'chenija, mehanicheskoy aktivacii tverdyh materialov s razrabotkoj vysokoeffektivnyh mashin i tehnologij dlja pererabotki othodov promyshlennosti: dis. ... dokt. tehn. nauk [Tekst] / P.P. Gujumdzhan. – Ivanovo. – 1989. – 403 s.
2. Parton, V.V. Mehanika uprugoplasticheskogo razrushenija [Tekst] / V.V. Parton, E.M. Morozov. – M: Nauka, 1974. – 416 s.

Ladaev Nikolay Mihajlovich

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Candidate of technical sciences, senior lecturer of department «Manufacture of building materials»
Ph.: +7 (4932) 41-36-09
E-mail: k_psm@igasu.ru

Guyumdzhyan Perch Pogosovich

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Doctor of technical science, professor of department «Manufacture of building materials»
Ph.: +7 (4932) 41-36-09
E-mail: k_psm@igasu.ru

ОГУРЦОВ В.А., ГОРОХОВА Е.Р., МАКАРОВА В.М., МЕДВЕДЕВА П.А.

ВИБРАЦИОННЫЙ ГРОХОТ КАК МНОГОПРОДУКТОВЫЙ КЛАССИФИКАТОР: КИНЕТИКА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФРАКЦИЙ

Вибрационный грохот может использоваться как многопродуктовый классификатор, если сита с последовательно убывающим размером ячейки расположены друг под другом. Целью исследования является построение математической модели для расчета кривой разделения вибрационного грохота относительно каждого из продуктов разделения. Модель основана на ячеечном представлении процесса. Миграция частиц каждой фракции над каждым ситом контролируется матрицей переходных вероятностей. Выход фракции под сито описан отдельно и зависит от вероятности прохождения фракции под сито в течение перехода. Модель позволяет рассчитывать кинетику выхода фракции в целевой продукт классификации. Сравнение этой кинетики и ограничений на чистоту получаемых фракций позволяет выбрать максимальную производительность подобного аппарата.

Ключевые слова: сыпучий материал, вибрационный грохот, вектор состояния, матрица переходных вероятностей.

В технологических процессах производства строительных материалов часто требуется сыпучее сырье с узким фракционным составом содержащихся в нем частиц. Разделение сыпучего исходного сырья на число фракций более двух допускает различное целевое использование получающихся фракций, т.е. повышает эффективность технологического использования сырья. Одним из возможных способов многопродуктовой классификации сыпучего полидисперсного материала является его грохочение на последовательности сит с поэтажной компоновкой с убывающими размерами отверстий. Целью настоящей статьи является математическое моделирование процесса классификации на верхнем и нижнем ситах. В основу ее построения положена ячеечная модель кинетики грохочения, описанная в работах [1, 2].

Расчетная схема процесса и его ячеечная модель показана на рисунке 1. Для упрощения описания процедуры построения модели рассмотрим в качестве исходного материала смесь трех монофракций с размерами x_1 , x_2 и x_3 с относительным содержанием f_1 , f_2 и f_3 соответственно. Грохот содержит два сита с ячейками размером $x_2 < h_1 < x_1$ и $x_3 < h_2 < x_2$. На верхнем сите классификации подвергаются все фракции, и фракции 2 и 3 выходят в подрешетный продукт, на нижнем – фракции 2 и 3, а в подрешетный продукт входит только фракция 3. Очевидно, что при неограниченном времени грохочения исходный материал будет точно разделен на все 3 фракции без загрязнения одних фракций другими. Однако продолжительность грохочения входит в противоречие с производительностью грохота, и важно знать, как происходит извлечение этих фракций в целевые продукты с течением времени, чтобы найти приемлемый компромисс между производительностью и загрязненностью одних фракций другими.

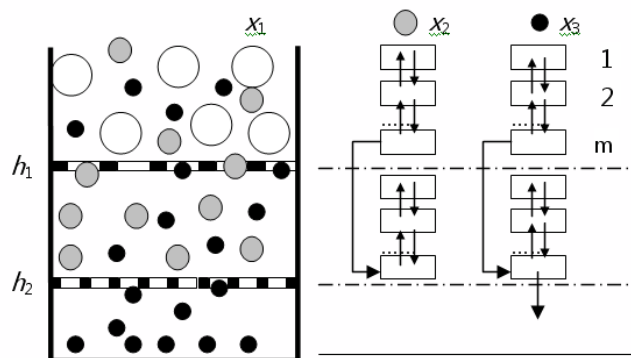


Рисунок 1 – Расчетная схема и ячеечная модель процесса многофракционного грохочения

Для построения алгоритма моделирования опишем миграцию частиц в надситовом пространстве как в закрытом объеме, а выход частиц в подрешетный продукт – через дополнительную функцию стока [2]. Каждое из надрешетных пространств разделено на m ячеек идеального смешения. Эволюция распределения содержания фракции в каждом надрешетном пространстве через дискретные промежутки времени Δt может быть описана матричным равенством:

$$S^{k+1} = P(S^k + S_s^k), \quad (1)$$

где k – номер временного перехода; S^k – вектор-столбец состояния, элементы которого есть относительное содержание фракции в ячейках надрешетного пространства; S_s^k – вектор стоков, учитывающий выход фракции из нижней ячейки в подрешетное пространство данного сита; P – матрица переходных вероятностей, которая в случае пренебрежения сегрегаций частиц в грохотимом слое имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где d – диффузионная составляющая вероятности перехода, которая в первом приближении может считаться независимой от размера фракции.

Переходы частиц из одного надрешетного пространства в другое (нижнее) описываются следующей системой соотношений:

$$\varepsilon_1(k+1) = S_{1m}^{k+1} v_f, \quad (3)$$

$$S_{1m}^{k+1} := S_{1m}^{k+1} - \varepsilon_1(k+1), \quad (4)$$

$$\varepsilon_2(k+1) = S_{2m}^{k+1} v_f, \quad (5)$$

$$S_{21}^{k+1} := S_{21}^{k+1} - \varepsilon_2(k+1) + \varepsilon_1(k+1), \quad (6)$$

$$S_{31}^{k+1} := S_{31}^{k+1} + \varepsilon_2(k+1), \quad (7)$$

где переход проходных частиц во второе подрешетное пространство происходит в нижнюю ячейку слоя.

Система уравнений (1)-(7) описывает эволюцию каждой фракции в отдельности. Уравнения для конкретной фракции в модели различаются только величинами v_f , для расчета которых можно использовать соотношение:

$$v_f = 9\Delta t \left(\frac{h}{H} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right) \text{ при } x < h \text{ и } v_f = 0 \text{ при } x > h, \quad (8)$$

где 9 – число контактов частицы с просеивающей поверхностью в единицу времени, зависящее от угла наклона, амплитуды и частоты колебаний сита; Δt – время одного перехода в матрице переходных вероятностей P ; x – размер проходной частицы; H – размер отверстий сита; h – размер отверстия живого сечения сита.

На рисунке 2 показана эволюция содержания фракций в надрешетных продуктах для фракций 2 и 3 при их равномерном начальном распределении по ячейкам (фракция 1 не покидает верхнее надрешетное пространство). Расчеты выполнены для размеров фракций 3,2 и 1 мм и размеров ячеек сита 2,1 и 1,1 мм, соответственно. Фракция 2 переходит в подрешетное пространство верхнего сита и остается там, как при обычном грохочении. Фракция 3 сначала переходит в надрешетное пространство второго сита, а затем проходит в его подрешетное пространство (на рисунке не показано), постепенно полностью исчезая из надрешетного.

Рисунок 3 иллюстрирует кинетику перехода фракций из верхнего надрешетного продукта в целевые и промежуточные продукты классификации. Для фракции 2 целевым является подрешетный продукт верхнего сита, или надрешетный продукт второго сита. Фракция 2, являясь «трудной» для принятого размера ячейки верхнего сита, проходит через него относительно медленно: процесс завершается за 600 временных переходов. При принятых параметрах подвижность фракции 3 гораздо выше, и, несмотря на то, что ей приходится добираться до своего целевого продукта через промежуточное надрешетное пространство второго

сита, ее полный выход в целевой продукт почти полностью завершается за число переходов менее 400. При этом фракция 2 выходит в целевой продукт на 94%, и если ее потеря с фракцией 1 в 6% технологически приемлема, то производительность грохочения может быть увеличена в 1,5 раза.

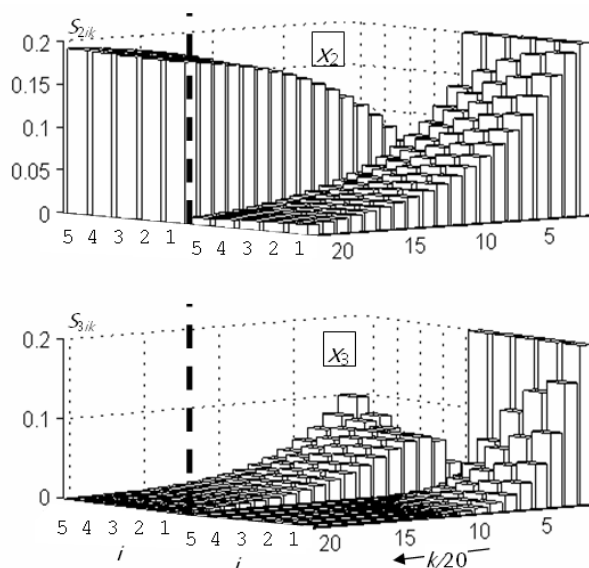


Рисунок 2 – Эволюция распределения различных фракций по высоте верхнего и среднего слоя грохочения

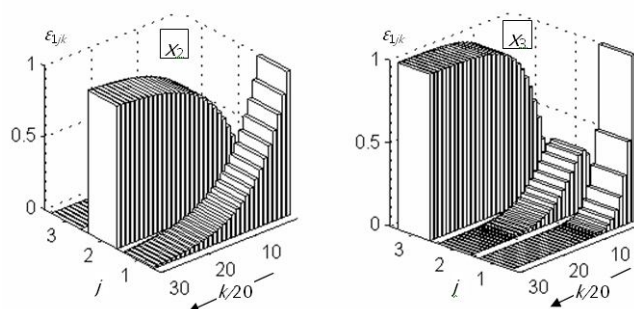


Рисунок 3 – Кинетика выхода различных фракций в целевой и не целевой продукты грохочения

Таким образом, располагая подобными расчетными зависимостями по выходу фракций в целевые продукты и технологическими ограничениями на чистоту этих фракций, можно выбирать время грохочения, соответствующее наибольшей производительности грохота при многопродуктовой классификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова [Текст] / В.А. Огурцов, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // Строительные материалы. – 2008. – №5. – С. 33-35.
2. Огурцов, В.А. Оптимизация геометрических характеристик виброгрохота [Текст] / В.А. Огурцов, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – №10. – С. 33-34.

Огурцов Валерий Альбертович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика»

Тел.: +7 962 156 69 08

E-mail.: ogurtzovvawork@mail.ru

Горохова Екатерина Романовна

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Аспирантка
Тел.: +7 920 671 63 81

Макарова Валентина Макаровна

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Старший преподаватель кафедры «Общая и строительная физика», соискатель
Тел.: +7 910 984 63 66

Медведева Полина Александровна

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Аспирантка
Тел.: +7 920 360 10 42

OGURTZOV V.A., GOROKHOVA E.R., MAKAROVA V.M., MEDVEDEVA P.A.

**VIBRATING ROAR AS THE MULTIGROCERY QUALIFIER:
KINETIKA EXTRACTION OF FRACTIONS**

A vibration screen can be used as a multi-product classifier if screens with decreasing size of openings are placed one under another. The objective of the study is to build a mathematical model for calculation of the grade efficiency curve for each undersize product in this process. The model is based on the cell presentation of the process. The matrix of transition probabilities controls the evolution of particle distribution of each fraction above each screen. The outflow of a fraction through a screen is described separately and depends on the probability of the fraction to go through the opening in the screen during one transition. The model allows calculating the kinetics of a fraction outflow into its objective product of classification. Comparison the kinetics and restrictions on fractions pureness allows choosing the maximum throughput of the apparatus.

Keywords: granular material, vibration screen, state vector, matrix of transition probabilities.

BIBLIOGRAPHY

1. Ogurcov, V.A. Modelirovanie kinetiki vibrogrohochenija na osnove teorii cepej Markova [Tekst] / V.A. Ogurcov, S.V. Fedosov, V.E. Mizonov // Stroitel'nye materialy. – 2008. – №5. – S. 33-35.
2. Ogurcov, V.A. Optimizacija geometricheskikh harakteristik vibrogrohota [Tekst] / V.A. Ogurcov, S.V. Fedosov, V.E. Mizonov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2008. – №10. – S. 33-34.

Ogyrtsov Valery Albortovich

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Doctor of technical science, professor of department «Building mechanics»
Ph.: 7 962 156 69 08
E-mail.: ogurtzovawork@mail.ru

Gorokhov Ekaterina Romanovna

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Post-graduate student
Ph.: +7 920 671 63 81

Makarova Valentine Makarovna

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Senior teacher of department «General and building physics », competitor
Ph.: +7 910 984 63 66

Medvedev Polina Aleksandrovna

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Post-graduate student
Ph.: +7 920 360 10 42

РОМАНОВ В.П., ГУЮМДЖЯН П.П., БОГОРОДСКИЙ А.В., ВЕТЮГОВ А.В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРУНДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассмотрена новая конструкция катково-тарельчатой мельницы с неравномерным движением катков, защищенная патентом РФ. Приведены технические характеристики сравниваемых лабораторных мельниц. Представлена сравнительная характеристика эффективности процесса тонкого измельчения корундовых материалов марок ГН и Г0 в шаровой, вибрационной и катково-тарельчатой мельницах. Сравнение проводилось по удельным энергозатратам и скорости измельчения. Показано, что удельная энергоемкость при измельчении глинозема марок ГН и Г0 в катково-тарельчатой мельнице ниже, чем в вибрационной и шаровой мельницах, а скорость измельчения выше.

Ключевые слова: тонкое измельчение, корундовые материалы, глинозем, мельница.

Во многих отраслях промышленности, в том числе и при производстве строительных материалов, широко применяются высокодисперсные порошки. Тонкое измельчение ведет к повышению однородности порошкообразных смесей и интенсифицирует процессы твердофазного спекания, что позволяет получать высококачественные изделия.

Однако реальная потребность в высокодисперсных порошках значительно превышает возможности их получения вследствие отсутствия надежных мельниц с низкими удельными энергозатратами.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка измельчителя, обладающего высокой энергонапряженностью и интенсивностью воздействия на обрабатываемый материал.

Основываясь на гипотезе, согласно которой изменение конструктивных особенностей существующих катково-тарельчатых мельниц позволит повысить эффективность измельчения хрупких материалов за счет создания в зоне разрушения значительных раздавливающесдвиговых напряжений, нами была разработана, изготовлена и внедрена в производстве технической керамики и огнеупоров конструкция катково-тарельчатой мельницы с неравномерным движением катков [1].

Катково-тарельчатая мельница (рисунок 1) содержит вращающуюся тарелку 1, установленную в корпусе 11. На тарелке размещены катки 2, футерованные керамическими кольцами, которые действуют на измельчаемый материал собственным весом и силой, развиваемой механизмом прижима 8. Катки 2 вращаются неравномерно с торможением, позволяющим создать значительные раздавливающесдвиговые усилия в зоне разрушения материала.

Для реализации неравномерного движения катков предусмотрен тормозной механизм, состоящий из двух колодок 4, соединенных планкой 3, и привода. Привод включает в себя раму 13, на которой смонтирован электродвигатель постоянного тока ЧП080В1 (ГОСТ 183-74), передающий вращательное движение профильному эксцентриковому кулачку 7 через клиноременную передачу.

С наружной поверхностью кулачка 7 контактирует подшипник качения 16, укрепленный в планке 3. Колодки 4, к которым крепятся пластины из полиуретана 13, совершают возвратнопоступательные движения в направляющих отверстиях верхней крышки 9 и передают усилие торможения каткам 2. При этом усилие на тормозные колодки 4 передается через пружины 18, а для обеспечения гарантированного зазора между катком 2 и тормозной колодкой 4 служит пружина возврата 10.

Давление на материал осуществляется с помощью тарированной пружины в механизме прижима катков 8. Изменение давления осуществлялось за счет регулировочного болта 5.

Для промышленного применения разработанной катково-тарельчатой мельницы с неравномерным движением катков был проведен сравнительный анализ эффективности ее работы с наиболее распространенными в керамической промышленности шаровыми и вибрационными мельницами в условиях тонкого помола технического глинозема марок ГН и Г0.

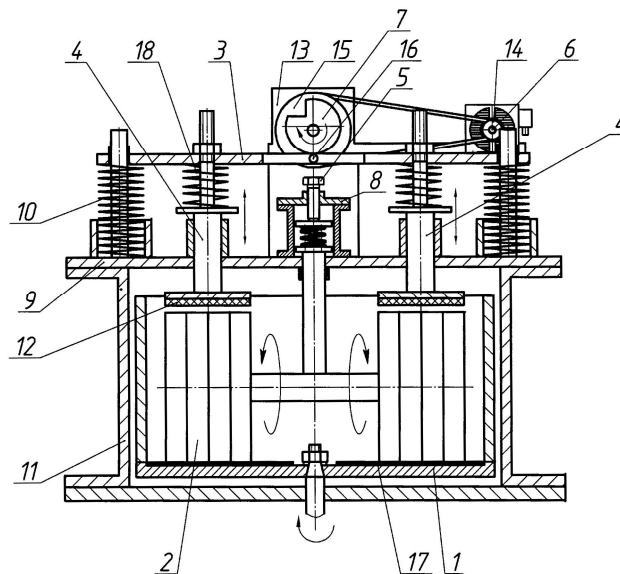


Рисунок 1 – Схема катково-тарельчатой мельницы с неравномерным движением катков:
 1 – тарелка; 2 – каток; 3 – планка; 4 – тормозная колодка; 5 – болт регулировочный усилия прижатия катка к тарелке; 6 – электродвигатель привода механизма торможения катков; 7 – эксцентриковый кулачок; 8 – механизм прижима катков; 9 – крышка верхняя; 10 – пружина возврата; 11 – корпус; 12 – пластина из полиуретана; 13 – рама привода механизма торможения; 14 – малый шкив; 15 – большой шкив; 16 – подшипник; 17 – футеровочный диск; 18 – пружина

Для сравнения были выбраны мельницы со следующими техническими характеристиками:

1. Катково-тарельчатая мельница с неравномерным движением катков: диаметр тарелки 0,36 м; диаметр катка 0,18 м, частота вращения тарелки 75 об./мин., суммарная мощность двигателя 3500 Вт, усилие прижима катков 600 Н, частота колебаний тормозных колодок 6 с⁻¹.

2. Шаровая барабанная мельница периодического действия (лабораторная) – диаметр барабана 0,2 м, частота вращения барабана 25 об./мин.; мощность двигателя 2200 Вт.

3. Вибрационная мельница (лабораторная) – объем барабана 5 л, частота вибрации 2920 Гц, амплитуда колебаний 0,003 м, мощность двигателя 1500 Вт.

Эффективность работы измельчителей оценивалась по удельной энергоемкости процесса помола $P_{уд}$ [2], характеризующей затраты энергии при получении единицы готового продукта (таблица 1).

Процесс измельчения технических глиноземов ГН и Г0 в рассматриваемых мельницах представлен на рисунке 2.

Результаты исследований свидетельствуют о высокой эффективности процесса тонкого измельчения корундовых порошков в разработанной катково-тарельчатой мельнице с неравномерным движением катков [1]. Как видно из графиков (рисунок 2) удельная энергоемкость при измельчении глиноземов ГН и Г0 в катково-тарельчатой мельнице меньше, чем в вибрационной и шаровой.

Таблица 1 – Оценка эффективности машин для тонкого помола

№ п/п	Тип мельницы	Измельчаемый материал	Показатели эффективности	
			Удельные энергозатраты ($P_{уд}$), кВт·ч/кг	Скорость измельчения ($W_{изм}$), м ² /кг·с
1	Катково-тарельчатая	Глинозем ГН	0,16	0,35
		Глинозем Г0	0,054	0,52
2	Шаровая	Глинозем ГН	7,92	0,0006
		Глинозем Г0	2,56	0,0011
3	Вибрационная	Глинозем ГН	1,5	0,015
		Глинозем Г0	0,5	0,026

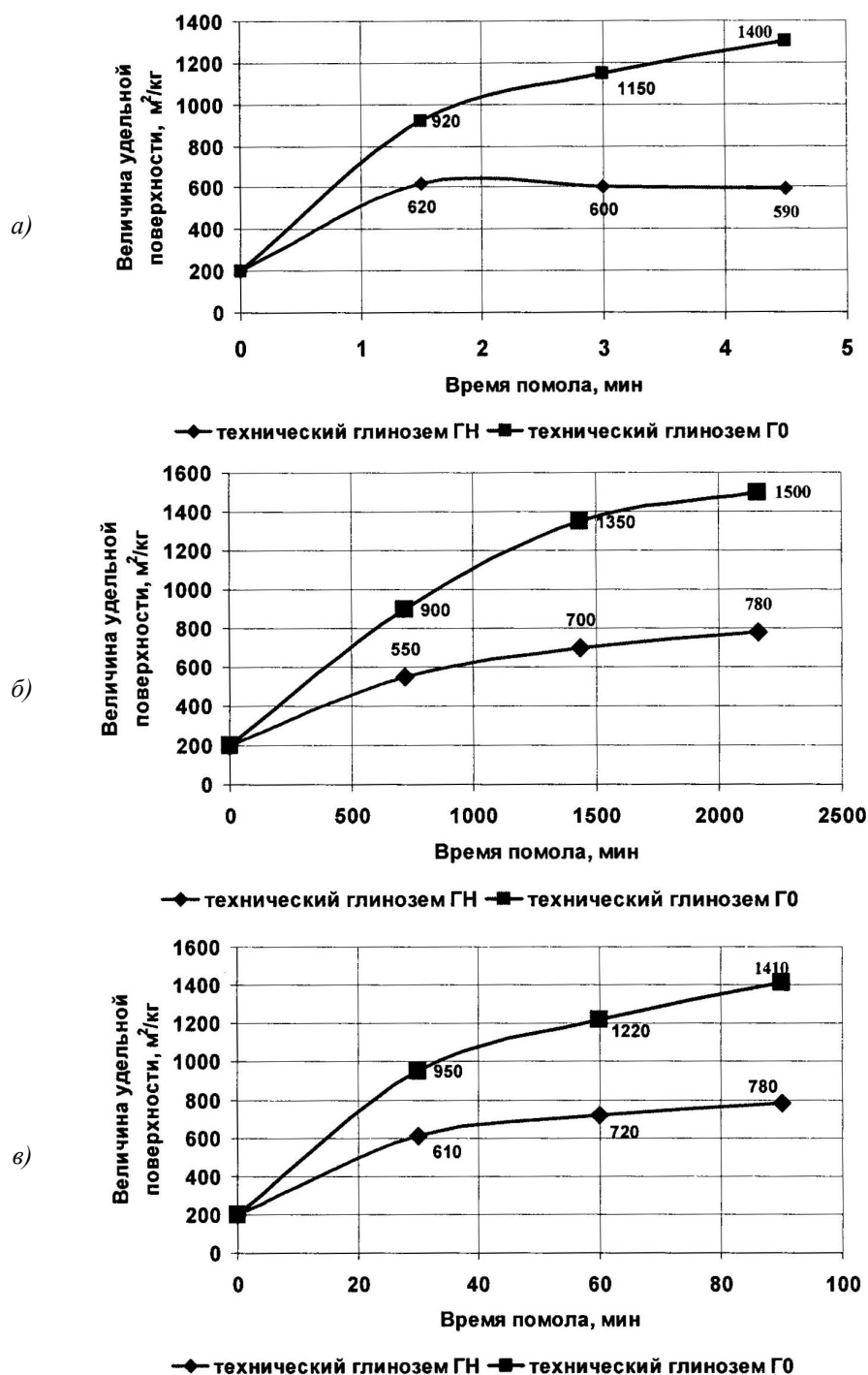


Рисунок 2 – Кинетика измельчения керамических материалов ГН и Г0: а – катково-тарельчатая мельница с неравномерным движением катков; б – шаровая мельница; в – вибрационная мельница

Итак, в результате сравнения процесса тонкого измельчения технического глинозема марок ГН и Г0 в шаровой, вибрационной и катково-тарельчатой мельницах подтверждена высокая эффективность разработанной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент №2395343 Российская Федерация, МПК В 02 С 15/00. Катково-тарельчатая мельница / П.П. Гуюмджян, А.В. Богородский, В.П. Романов, Д.Г. Кулагин // Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ИГАСУ. – 2009113912/03; заявл. 13.04.2009; опубл. 27.07.2010. – Бюл. №21.
2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности [Текст] / П.М. Сиденко – М.: Химия. – 1977. – 368 с.

BIBLIOGRAPHY

1. Patent №2395343 Rossijskaja Federacija, MPK V 02 S 15/00. Katkovo-tarel'chataja mel'nica / P.P. Gujumdzhan, A.V. Bogorodskij, V.P. Romanov, D.G. Kulagin // Zajavitel' i patentoobladatel' GOU VPO IGASU. – 2009113912/03; zajavl. 13.04.2009; opubl. 27.07.2010. – Bjul. №21.
2. Sidenko P.M. Izmel'chenie v himicheskoj promyshlennosti [Tekst] / P.M. Sidenko – M.: Himija. – 1977. – 368 s.

Романов Владимир Павлович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Аспирант кафедры «Производство строительных материалов»
Тел.: +7 (4932) 41-39-06

Гуямджян Перч Погосович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново
Доктор технических наук, профессор кафедры «Производство строительных материалов»
Тел.: +7 (4932) 41-39-06
E-mail: s.kokanin@yandex.ru

Богородский Анатолий Васильевич

Филиал государственного образовательного учреждения Московского государственного индустриального университета в г. Кинешме, г. Кинешма
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобиле- и тракторостроение»
Тел.: +7 (49331) 5-82-50

Ветюгов Александр Викторович

Филиал государственного образовательного учреждения Московского государственного индустриального университета в г. Кинешме, г. Кинешма
Старший преподаватель кафедры «Автомобиле- и тракторостроение»
Тел.: +7 (49331) 5-82-50

ROMANOV V.P., GUYUMDZHYAN P.P., BOGORODSKIY A.V., VETYUGOV A.V.

INCREASE OF EFFICIENCY OF PROCESS OF THIN CRUSHING CORUNDUM OF MATERIALS

In this article a new construction of roller and plate mill with unevenly rotating rollers registered as an RF patent is presented. Technical characteristics of laboratory mills to be compared are given here. In article the comparative characteristic of efficiency of process of thin crushing corundum materials of marks GN and G0 in spherical, vibrating and roller and plate mills are presented. Comparison was conducted on specific power inputs and is crushing speed. It is shown that specific power consumption at crushing of alumina of marks GN and G0 in roller and plate mill is lower than in vibrating and spherical mills, and crushing speed is higher.

Keywords: thin crushing, corundum materials, alumina, a mill.

Romanov Vladimir Pavlovich

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Post-graduate student of department «Manufacture of building materials»
Ph.: +7 (4932) 41-39-06

Gujumdzhan Perch Pogosovich

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo
Doctor of technical science, professor of department «Manufacture of building materials»
Ph.: +7 (4932) 41-39-06

Bogorodsky Anatoly Vasilevich

Branch of the state educational institution of the Moscow state industrial university in Kineshma, Kineshma
Candidate of technical science, associate professor, head of department «Car- and tractor to create»
Ph.: +7 (49331) 5-82-50

Vetjugov Alexandr Viktorovich

Branch of the state educational institution of the Moscow state industrial university in Kineshma, Kineshma
Senior teacher of department «Car- and tractor to create»
Ph.: +7 (49331) 5-82-50

СОЛОМЕНЦЕВ А.Б., БАРАНОВ И.А.

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ ЩМА НА СВОЙСТВА ВЯЗКОГО ДОРОЖНОГО БИТУМА

В статье представлены результаты экспериментальных исследований стабилизирующих добавок для ЩМА на физико-механические показатели свойств вязкого дорожного битума. Приведены сравнительные характеристики наиболее известных и применяемых стабилизирующих добавок. Объясняются особенности модификации битума стабилизирующими добавками и характер распределения в зависимости от исходного сырья, из которого они изготовлены. Также представлен механизм взаимодействия битума с добавками при приготовлении. Сделаны выводы о степени влияния стабилизирующих добавок в зависимости от их процентного соотношения на свойства битума.

Ключевые слова: стабилизирующие добавки, вязкий дорожный битум, модификация.

Стабилизирующие добавки в щебеночно-мастичном асфальтобетоне (ЩМА) предназначены для удерживания (фиксирования) битума в межзерновом пространстве щебеночного каркаса щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМАС) с помощью образующейся в результате ее приготовления мастики, т.е. асфальтовязующего, состоящего из битума, минерального порошка, стабилизирующей добавки с битумоудерживающими свойствами, а также других модифицирующих добавок (адгезионных, структурирующих и т.д.).

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по изучению структуры и физико-механических свойств дорожного битума с наиболее известными и применяемыми стабилизирующими добавками.

Показатели свойств битума нефтяного дорожного БНД 60/90 Московского НПЗ приведены в таблице 1. В качестве стабилизирующих добавок были взяты: Viator 66, СД-1, AN-TROCEL-G, TOPCEL, РТЭП, Хризотоп, УНИРЕМ. Viator 66 представляет собой гранулированную смесь из примерно 67% технической целлюлозы и 33% битума [1]. Добавка СД-1 представляет собой гранулы диаметром 6-7 мм светло-коричневого цвета, изготовленные из волокон сульфатной небеленой целлюлозы [2]. Стабилизирующая добавка AN-TROCEL-G – гранулированное целлюлозное волокно, содержащее 20% битума, с диаметром гранул 5-7 мм. Добавка TOPCEL представляет собой спрессованные гранулы из волокон целлюлозы, которые не содержат битум, но включают от 10 до 15% парафиновых углеводородов [3]. Резиновый термоэластопласт РТЭП представляет собой гранулы темного цвета размером 2-6 мм и является многокомпонентной композицией на основе полиолефинового полимерного носителя, содержащего дорожный битум [4]. Хризотоп производится из природного материала хризотил-асбеста, диаметр гранул до 5,5 мм [5]. УНИРЕМ-001 представляет собой резиновый порошок с добавками [6]. Некоторые характеристики различных стабилизирующих добавок представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Показатели свойств битума нефтяного дорожного БНД 60/90 Московского НПЗ

№ п/п	Наименование показателя, единица измерения	Результат испытания	Нормы по ГОСТ 22245-90 с изм. для марки БНД 60/90
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25°C 0°C	76 23	от 61 до 90 не менее 20
2	Температура размягчения по кольцу и шару, °C	50	не ниже 47
3	Растяжимость, см при 25°C 0°C	100,0 4,2	не менее 55 не менее 3,5
	Температура хрупкости, °C	-17	не выше -15

Таблица 2 – Характеристики стабилизирующих добавок

№ п/п	Название стабилизирующей добавки	Характеристики волокон	Значение
1	VIATOR 66	Насыпная плотность, г/см ³	0,65-0,505
		Средняя длина волокон, мм	1,1
		Средний диаметр волокон, мм	0,045
2	ХРИЗОТОП	Насыпная плотность, г/см ³	0,95
		Средняя длина волокон, мм	4,0
		Средний диаметр волокон, мм	0,05
3	СД-1	Насыпная плотность, г/см ³	0,55-0,65
		Средняя длина волокон, мм	1,2-1,9
		Средний диаметр волокон, мм	0,05
4	TORCEL	Насыпная плотность, г/см ³	0,25
		Средняя длина волокон, мм	0,8-1,1
		Средний диаметр волокон, мм	0,05
5	ANTROCEL-G	Насыпная плотность, г/см ³	0,45-0,50
		Средняя длина волокон, мм	1,0-1,1
		Средний диаметр волокна, мм	0,045-0,05
6	РТЭП	Насыпная плотность, г/см ³	0,347
7	УНИРЕМ-001	Насыпная плотность, г/см ³	0,49

Приготовление битума с добавками осуществлялось следующим образом. Стабилизирующие добавки вводились в разогретый до 150-160°C битум и перемешивались в нем вручную до однородного состояния. Добавки СД-1 и Viator 66 распределялись в битуме достаточно хорошо в течение 20 минут, а Torcel, Antrocel и Хризотоп растворялись в течение 30-40 минут. Из-за сильной спрессованности гранул без предварительного разрушения Torcel, Antrocel, Хризотоп плохо распределяются в битуме, поэтому были механически разрушены в фарфоровой ступке вручную до распушенного состояния. После этого можно было добиться окончательного распределения добавок в битуме. По внешнему виду битум с волокнистыми добавками представляет собой подвижную, кашеподобную смесь с черным блеском. После окончательного распределения добавок при прекращении перемешивания часть волокон осаждалась на дно. Волокна Хризотоп в большей степени осаждаются на дно, т.к. истинная плотность хризотил-асбеста почти в два раза выше (2,5-2,6 г/см³) плотности целлюлозы (1,3-1,4 г/см³).

Гранулированный РТЭП расплавлялся в битуме при 170°C, равномерно распределялся при длительном нагревании и перемешивании, его введение сопровождалось повышением вязкости битума.

Процесс распределения целлюлозных волокнистых добавок в битуме можно представить следующим образом. Под действием температуры и вследствие проникновения компонентов битума внутрь гранул они набухают и при механическом перемешивании распадаются. Процесс набухания состоит в пропитывании волокон битумом. Способность целлюлозы к набуханию определяется ее составом и строением. Целлюлоза является природным полимером и представляет собой волокнистое вещество фибриллярной капиллярно-пористой структуры. В процессе перемешивания структурные элементы битума реагируют с макромолекулами волокон и вступают с ними в адсорбционное взаимодействие внутри волокон на свободных поверхностях элементарных фибрилл. Минеральная волокнистая добавка Хризотоп также как и целлюлоза не растворяется в битуме. Змеевиковый хризотил-асбест является минералом группы серпентинита, представляет собой водный силикат магния, имеющий длинноволокнистую структуру. Его волокна характеризуются повышенной прочностью и большим количеством микропучков волокон. Из-за того, что хризотил-асбест не обладает такой же пористой структурой как целлюлоза, он в меньшей степени обладает битумоудерживающей способностью [7]. Причиной набухания при введении битума является распределение компонентов битума по поверхности и внутрь микропучков волокон, каждое волокно в пучке покрывается битумной пленкой, объем микропучков увеличивается.

Показатели свойств битума с добавками приведены в таблице 3, а зависимости показателей свойств от содержания добавок в битуме на рисунках 1-5.

Таблица 3 – Показатели свойств битума с добавками

№ п/п	Наименование показателя, единица измерения	Содержание добавки в битуме, %	Название добавки						
			Хризотоп	Antrocel	СД-1	Topcel	РТЭП	Viator 66	УНИРЕМ-001
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25°C 0°C	2	47,0	51,5	63,7	54,6	71,3	56,4	70,3
			23,4	26,0	26,4	24,7	30,2	20,2	21,4
		4	40,2	38,4	48,3	36,7	51,0	43,2	63,2
			25,8	26,7	24,1	28,2	32,6	23,3	22,0
		5	37,4	34,7	38,3	35,3	42,0	33,6	54,3
			25,3	26,1	24,7	27,3	30,0	22,3	21,5
		7	36,3	34,7	37,3	34,0	38,1	32,2	50,0
			23,3	25,0	28,0	26,7	28,4	24,8	20,0
2	Температура размягчения по кольцу и шару, °C	2	64	65	54	58	60	50	52
		4	67	65	63	60	64,5	62	53
		5	75	69	62	58	65	65	55
		7	78	74	69	73	76	70	56
3	Растяжимость, см при 25°C 0°C	2	43,3	29,5	56,0	40	77,7	38,4	63
			3,5	5,2	4,3	4,5	6,0	5,1	5,5
		4	30,5	19,8	35,7	38,7	48,4	29,4	48,5
			4,0	4,9	5,7	5,5	6,3	5,6	5,3
		5	27,2	15	18,8	27,6	30,1	23,5	30,5
			4,2	5,1	5,7	6,1	7,2	5,5	5,0
		7	5,3	10,0	5,6	5,8	20,3	5,0	25,0
			3,6	4,2	3,5	4,2	6,7	5,2	4,5
4	Температура хрупкости, °C	2	-18	-17	-20	-20	-21	-18	-15
		4	-25	-17	-25	-26	-22	-22	-13
		5	-22	-24	-24	-24	-21	-25	-14
		7	-19	-27	-23	-23	-20	-27	-18

На рисунке 1 приведена зависимость значений проникания иглы в битум с добавками при 25°C от содержания добавок в нем. При введении 2% добавки глубина проникания иглы при 25°C для РТЭП составляет 71,3 (0,1 мм), СД-1 – 63,7 (0,1 мм), Viator 66 – 56,4 (0,1 мм), Antrocel – 51,5 (0,1 мм), Topcel – 54,6 (0,1 мм), УНИРЕМ-001 – 70,3 (0,1 мм). Самое минимальное значение имеет Хризотоп – 47,0 (0,1 мм), что на 38,1% ниже показателя глубины проникания иглы битума без добавок. При 4% УНИРЕМ-001 имеет самое высокое значение проникания иглы – 63,2 (0,1 мм), остальные добавки находятся в диапазоне 36,7-51,0 (0,1 мм). При увеличении концентрации добавки от 5 до 7% продолжается снижение показателей, т.к. увеличивается жесткость: так при 7% максимальное значение глубины проникания иглы для УНИРЕМ-001 – 50,0 (0,1 мм), РТЭП – 38,1 (0,1 мм), СД-1 – 37,3 (0,1 мм), Хризотоп имеет – 36,3 (0,1 мм), Antrocel и Topcel имеют одинаковые значения. У Viator 66 самый низкий показатель глубины проникания иглы – 32,2 (0,1 мм), что на 57,5% меньше чем у битума без добавок.

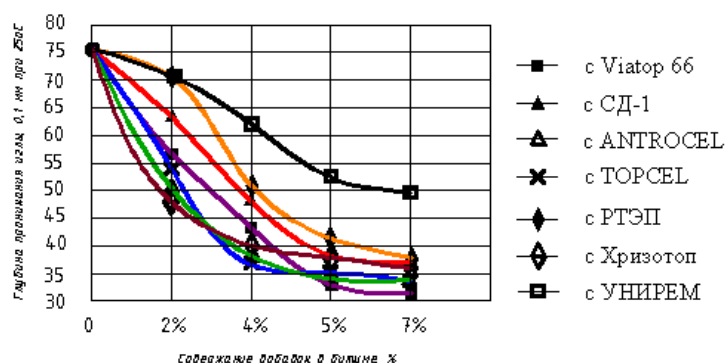


Рисунок 1 – Зависимость значений глубины проникания иглы в битум при 25°C от содержания добавки в нем

На рисунке 2 приведена зависимость значений глубины проникания иглы в битум с добавками при 0°C от содержания добавок в нем. Глубина проникания иглы при 0°C при 2%

стабилизирующей добавки равна для Хризотоп – 23,4 (0,1 мм), Torcel – 24,7 (0,1 мм), Унирем – 21,4 (0,1 мм), Antrocel и СД-1 равны 26,0 (0,1 мм) и 26,4 (0,1 мм) соответственно. Viator 66 имеет значение 20,2 (0,1 мм), что на 12,2% ниже показателя глубины проникания иглы битума без добавок. При дальнейшем увеличении добавки при 4, 5, 7% значения находятся в диапазоне от 20,0 (0,1 мм) до 32,6 (0,1 мм). Так при 4% максимальное значение у РТЭП – 32,6 (0,1 мм) минимальное УНИРЕМ-001 – 22,0 (0,1 мм), Antrocel – 26,7 (0,1 мм), Хризотоп – 25,8 (0,1 мм), Torcel – 28,2 (0,1 мм) и Viator 66 – 23,3 (0,1 мм). При 5% значения находятся в пределах от 22,3 (0,1 мм) – Viator 66 до 30,0 (0,1 мм) – РТЭП. При 7% Хризотоп имеет 23,3 (0,1 мм), Antrocel – 25,0 (0,1 мм), СД-1 – 28,0 (0,1 мм), Torcel – 26,7 (0,1 мм), РТЭП – 28,4 (0,1 мм), УНИРЕМ-001 – 20,0 (0,1 мм) и Viator 66 – 24,8 (0,1 мм). Добавка РТЭП имеет высокий показатель глубины проникания иглы из-за структурирования битума.

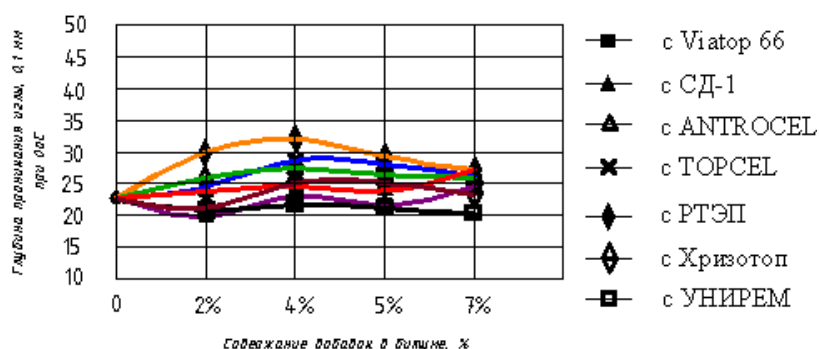


Рисунок 2 – Зависимость значений глубины проникания иглы в битум при 0°C от содержания добавки в нем

На рисунке 3 приведена зависимость значений растяжимости битума при 25°C от содержания добавки в нем. Растяжимость битума с добавками при 25°C снижается: при 2% РТЭП – 77,7 см, УНИРЕМ-001 – 63 см, Viator 66 – 38,4 см, Torcel – 40 см, СД-1 – 56,0 см, Antrocel – 29,5 см, Хризотоп – 43,3 см. При дальнейшем увеличении содержания добавки жесткость битума повышается еще больше. При 4% минимальное значение имеет Antrocel – 19,8 см, а максимальное УНИРЕМ-001 – 48,5 см. При добавки УНИРЕМ-001 5% растяжимость имеет значение 30,5 см, а при 7% – 25,0 см. Минимальный показатель растяжимости при 5% имеет Antrocel – 15 см, при 7% Viator 66 – 5 см.

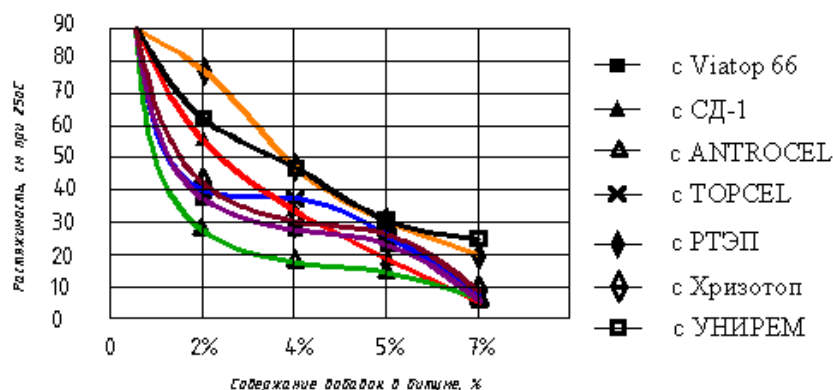


Рисунок 3 – Зависимость значений растяжимости битума при 25°C от содержания добавки в нем

На рисунке 4 приведена зависимость значений растяжимости битума при 0°C от содержания добавки в нем. Растяжимость битума с различными добавками при 0°C существенного различия не имеет и соизмерима с битумным вяжущим без добавок. Однако структурирующая добавка РТЭП дает повышение растяжимости при 2% – 6 см, 4% – 6,3 см, 5% – 7,2 см, 7% – 6,7 см. Хризотоп имеет минимальные значения 2% – 3,5 см, 4% – 4,0 см, 5% – 4,2 см, 7% – 3,6 см.

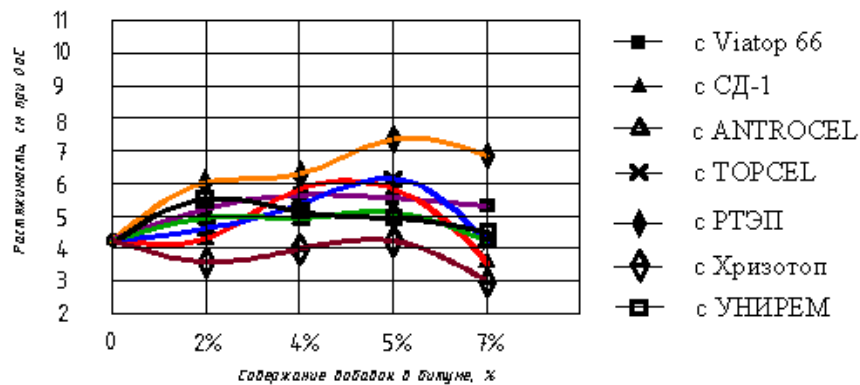


Рисунок 4 – Зависимость значений растяжимости битума при 0°С от содержания добавки в нем

На рисунке 5 приведена зависимость значений температуры размягчения битума от количества добавки в нем. Температура размягчения по кольцу и шару (T_p) для битума без добавок составляет 50°С. С введением 2% Хризотоп T_p битума увеличивается до 64°С, Antrocel до 65°С, СД-1 до 54°С, Topcel до 58°С, РТЭП до 50°С, Viator 66 до 50°С, УНИРЕМ-001 до 52°С. При содержании 4% добавок значения T_p находятся в диапазоне от 53°С – УНИРЕМ-001 до 67°С – Хризотоп. Дальнейшее повышение концентрации добавок приводит к увеличению температуры размягчения. Максимальной T_p при 5% обладает битум с Хризотоп – 75°С, РТЭП и Viator 66 – 65°С. Минимальную T_p имеет битум с УНИРЕМ-001 – 55°С, СД-1 – 62°С, Antrocel – 69°С. При 7% максимальное значение T_p у битума Хризотоп – 78°С, а минимальное у битума с УНИРЕМ-001 – 56°С. Таким образом, с увеличением содержания всех добавок температура размягчения увеличивается, т.е. увеличивается вязкость и прочность структуры битума.

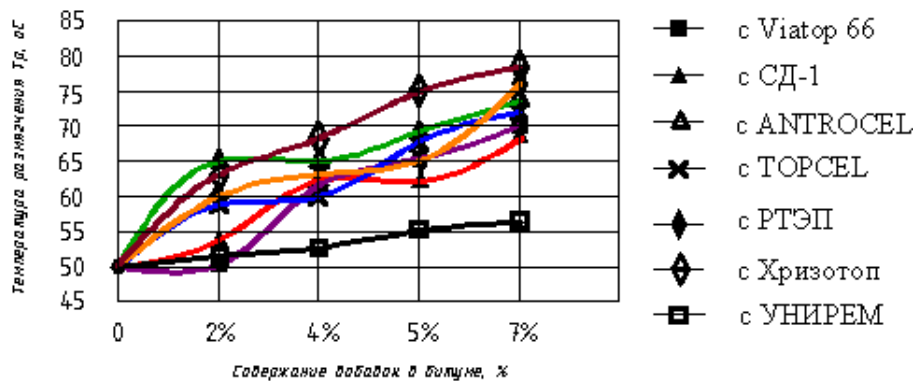


Рисунок 5 – Зависимость значений температуры размягчения битума от количества добавки в нем

На рисунке 6 приведена зависимость значений температуры хрупкости битума от количества добавки в нем. Температура хрупкости битума без добавок составляет -17°С, с введением 2% добавки изменяется, так для СД-1 – (-22°С), Хризотоп – (-18°С), Antrocel – (-17°С), Topcel – (-20°С), РТЭП – (-21°С), Viator 66 – (-18°С) и УНИРЕМ-001 – (-15°С). При 4% минимальное значение у добавки УНИРЕМ-001 – (-13°С), а максимальное у Topcel – (-26°С). Хризотоп и СД-1 имеют одинаковые показатели – (-25°С). При большем количестве добавки 5% показатель хрупкости для Хризотоп – (-22°С), РТЭП – (-21°С), Viator 66 – (-25°С), УНИРЕМ-001 – (-14°С). Значения для Antrocel, СД-1, Topcel – (-24°С). При 7% концентрации добавки в битуме температура хрупкости продолжает понижаться, так у УНИРЕМ-001 – (-18°С), Antrocel и Viator 66 – (-27°С). Незначительное повышение показателя хрупкости происходит у РТЭП – (-20°С), Хризотоп – (-19°С), СД-1 и Topcel – (-23°С).

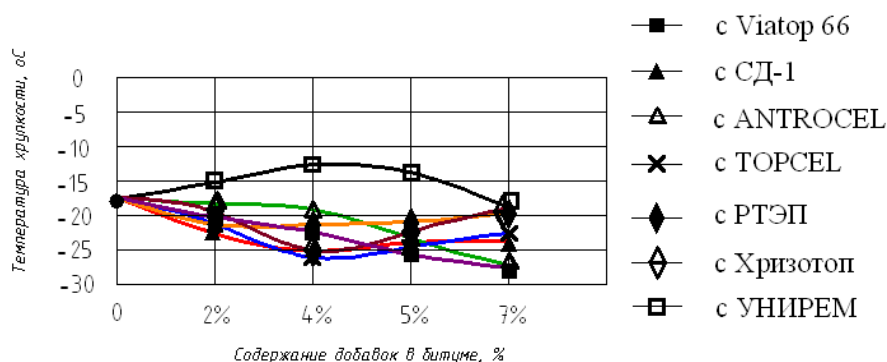


Рисунок 6 – Зависимость значений температуры хрупкости битума от количества добавки в нем

В заключении можно сделать вывод, что рассмотренные в статье добавки минеральные и полимерные, волокнистые, в виде резинового порошка, полимерных гранул при введении в битум увеличивают его вязкость, снижают растяжимость при 25°C, повышают теплоустойчивость, понижают температуру хрупкости. Рассмотренные добавки по их влиянию на свойства битума можно отнести к структурирующим добавкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ 5718-001-18268513-01. Стабилизирующая добавка VIATOR 66. Технические условия [Текст].
2. СТО 77142208-001-2007. Стабилизирующая добавка СД-1 ГБЦ для щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Стандарт организации [Текст].
3. ТУ 5711-001-38956563-2003. Добавки стабилизирующие «TECHNOCEL 1004» и «TOPCEL» для смесей щебеночно-мастичных асфальтовых. Технические условия [Текст].
4. ТУ 5718-001-79259416-2006. Термоэластопласт резиновый «РТЭП». Технические условия [Текст].
5. ТУ 5718-011-0281476-2004. Гранулированный стабилизатор «Хризотоп». Технические условия [Текст].
6. СТО 61595504-002-2010. Материал композиционный «УНИРЕМ-001» на основе активного резинового порошка. Технические условия [Текст].
7. Соломенцев, А.Б. Исследование свойств асфальто вяжущего, модифицированного добавками Viatop 66 и Хризотоп [Текст] / А.Б. Соломенцев, И.А. Баранов // Известия ОрелГТУ. – Орел: ОрелГТУ. – 2009. – №2/22(554). – С. 77-80.

Соломенцев Александр Борисович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»
Тел.: +7 (4862) 73-43-67
E-mail: oante@ostu.ru

Баранов Игорь Александрович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Ассистент кафедры «Строительство автомобильных дорог»
Тел.: +7 (4862) 73-43-67
E-mail: Igbaranow@yandex.ru

SOLOMENTSEV A.B., BARANOV I.A.

INFLUENCE OF STABILIZING ADDITIVES FOR RMA ON PROPERTIES OF VISCOUS ROAD BITUMEN

The article presents the results of experimental studies of stabilizing additives for SMA on the physico-mechanical properties of viscous bitumen. Comparative characteristics of the most famous and used stabilizing additives. Explains the characteristics of bitumen modification of stabilizing additives and the nature of the distribution, depending on the feedstock from which they are made. Also presented the mechanism of interaction of bitumen with additives when cooking. The conclusions about the degree of influence of stabilizing additives, depending on their percentage of the properties of bitumen.

Keywords: *stabilizing additives, viscous road bitumen, modification.*

BIBLIOGRAPHY

1. TU 5718-001-18268513-01. Stabiliziruwaja dobavka VIATOP 66. Tehnicheskie uslovija [Tekst].
2. STO 77142208-001-2007. Stabiliziruwaja dobavka SD-1 GBC dlja webjonochno-mastichnyh asfal'tobetonnyh smesej. Standart organizacii [Tekst].
3. TU 5711-001-38956563-2003. Dobavki stabilizirujuwe «TECHNOCEL 1004» i «TOPCEL» dlja smesej webenochno-mastichnyh asfal'tovyh. Tehnicheskie uslovija [Tekst].
4. TU 5718-001-79259416-2006. Termojelastoplast rezinovyj «RTJeP». Tehnicheskie uslovija [Tekst].
5. TU 5718-011-0281476-2004. Granulirovannyj stabilizator «Hrizotop». Tehnicheskie uslovija [Tekst].
6. STO 61595504-002-2010. Material kompozicionnyj «UNIREM-001» na osnove aktivnogo rezinovogo poroshka. Tehnicheskie uslovija [Tekst].
7. Solomencev, A.B. Issledovanie svojstv asfal'tovjazhuwego, modificirovannogo dobavkami Viatop 66 i Hrizotop [Tekst] / A.B. Solomencev, I.A. Baranov // Izvestija OrelGTU. – Orel: OrelGTU. – 2009. – №2/22(554). – S. 77-80.

Solomentsev Alexander Borisovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel

Senior lecturer of department «Construction of highways»

Ph.: +7 (4862) 73-43-67

E-mail: oantc@ostu.ru

Baranov Igor Aleksandrovich

State University – Educational-Science-Production Complex, Orel

Assistant to department «Construction of highways»

Ph.: +7 (4862) 73-43-67

E-mail: Igbaranow@yandex.ru

ХРИСТОФОРОВ А.И., ХРИСТОФОРОВА И.А., ПИКАЛОВ Е.С.,
КУТРОВСКАЯ С.В.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КЕРАМИКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

В статье представлены закономерности формирования и изменения структуры керамического материала на основе сырья с низким содержанием оксида алюминия (менее 13%) при разной температуре обжига и при введении в состав сырьевой смеси модифицирующих добавок. Проведена оценка влияния структуры на прочностные характеристики, подтвержденная экспериментальными данными и соотношенная с теоретическими представлениями о структурообразовании при спекании. Представлено визуальное отображение структуры материала в виде фотографий, полученное при помощи растрового электронного и атомно-силового микроскопов.

Ключевые слова: *стеклобой, поверхностно активные вещества, шихта, структура, спекание, твердая фаза, аморфная фаза, электронно-микроскопические исследования.*

Физико-механические и эксплуатационные характеристики керамического кирпича находятся в прямой зависимости от структуры материала, формируемой на протяжении всего технологического цикла и завершаемой после охлаждения готовых изделий. Под структурой понимают количественное соотношение и взаимное распределение зерен и фаз вещества и пор. При этом наибольшее влияние на процессы структурообразования оказывают состав шихты и режим обжига [1, 2].

В настоящее время развитие производства керамического кирпича связано с широким применением модифицирующих добавок, позволяющих получить строительный материал с заданным комплексом свойств. Учитывая требуемые величины свойств керамического кирпича и соотнося их со свойствами сырьевых материалов при правильном подборе технологических режимов производства (формование, сушка, обжиг) возможно получение изделий высокого качества на основе низкосортных глин. Это позволяет в полной мере использовать сырьевую базу для производства строительных материалов и изделий. Введение модифицирующих добавок и изменение технологического режима производства оказывает воздействие на формирование макроструктуры исследуемого материала, что и позволяет получить керамический кирпич с требуемыми характеристиками [3-8].

Данная работа была направлена на исследование физико-механических свойств керамического кирпича на основе кислой глины ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 13\%$). Для стеновой керамики основное значение имеют прочностные характеристики, а поэтому особое внимание при проведении исследований уделялось получению их максимальных значений. Исходным пунктом исследований была разработка состава шихты на основе глины Суворотского месторождения Владимирской области. Глина содержит следующие оксиды (содержание в масс. %): 64,0-71,0 SiO_2 ; 8,7-13,35 Al_2O_3 ; 4,9-6,8 Fe_2O_3 ; 0,7-4,9 CaO ; 0,7-2,7 MgO ; 1,9-2,9 K_2O ; 0,2-1,2 Na_2O . Карьерная влажность глины составляла 19-21,5 %, а поэтому предусматривалась предварительная сушка глины до влажности не более 1%.

Исследования физико-механических характеристик проводились путем измерения плотности, прочности при сжатии, пористости и водопоглощения, а также при контроле внешнего вида образцов. Методика определения свойств керамического кирпича соответствовала ГОСТ 7025-91 «Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости», ГОСТ 8462-75 «Прочность на сжатие стеновых и облицовочных материалов» и ГОСТ 2409-80 «Методы определения пористости стеновых и облицовочных материалов».

Модификация шихты осуществлялась путем введения в шихту добавок: стеклобоя и олеата натрия $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COONa}$ (поверхностно активное вещество – ПАВ). При проведении ис-

следований применялся бой тарного зеленого стекла следующего состава (содержание в масс. %): 66,7-68,7 SiO₂; 4,5-5,5 Al₂O₃; 1,3-1,5 Fe₂O₃; 5,75-6,25 CaO; 3,75-4,25 MgO; 14,25-14,75 Na₂O. Экспериментальным путем было установлено количественное соотношение компонентов шихты для производства керамического кирпича по методу полусухого прессования (влажность шихты = 8 масс. %) при удельном давлении 15 МПа, сушке при максимальной температуре 90°C в течение 7 часов. Обжиг керамики проводился при температурах 950, 1000 и 1050°C. Подбор параметров технологических режимов производства также был направлен на получение максимальных значений прочностных характеристик изделий.

Величины полученных физико-механических характеристик керамического кирпича, обожженного при температуре 1050°C и изготовленного из различных составов шихты на основе исследуемой глины, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики керамического кирпича, изготовленного на основе исследуемых составов

Состав	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Пористость, %
Исходный состав (температура обжига 950°C)	15,1 ^{±0,4}	1651 ^{±22}	13,9 ^{±0,1}	13,0 ^{±0,1}
Исходный состав (температура обжига 1000°C)	16,4 ^{±0,4}	1711 ^{±22}	13,5 ^{±0,1}	12,5 ^{±0,1}
Исходный состав (температура обжига 1050°C)	18,8 ^{±0,4}	1777 ^{±22}	12,7 ^{±0,1}	11,7 ^{±0,1}
Состав, модифицированный ПАВ	19,7 ^{±0,4}	1746 ^{±22}	12,4 ^{±0,1}	10,6 ^{±0,1}
Состав, модифицированный стеклобоем	23,3 ^{±0,4}	1802 ^{±22}	8,2 ^{±0,1}	9,0 ^{±0,1}
Состав, модифицированный ПАВ и стеклобоем	27,4 ^{±0,4}	1922 ^{±22}	9,2 ^{±0,1}	7,9 ^{±0,1}

Как следует из данных, представленных в таблице 1, применение рассматриваемых модифицирующих добавок как по отдельности, так и при совместном введении в состав шихты, позволяет повысить прочностные характеристики керамического кирпича, полученного на основе исследуемой глины. Чтобы исследовать механизм влияния ПАВ и стеклобоя на физико-механические свойства строительного материала была исследована структура керамического кирпича, полученного на основе составов, представленных в таблице 1.

Визуальное отображение макроструктуры керамики представлено на фотографиях, полученных при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) Quanta 200 3D. Для описания представленных на фотографиях рисунков применялись теоретические представления о процессе спекания, представленные в литературных источниках [1, 9].

В первую очередь необходимо рассмотреть структуру керамического кирпича, полученного при различной температуре обжига на основе шихты без введения модифицирующих добавок, представленную на рисунке 1. Это позволит оценить процессы структурообразования, протекающие в исследуемой глине при обжиге, и структуру керамического кирпича в целом.

Как видно из фотографий, представленных на рисунке 1, исходный состав шихты (рисунок 1, а) приводит к образованию неоднородной структуры, характеризующейся зональным обособлением при спекании. Плотные и прочные агломераты частиц слабо связаны между собой, что обуславливает невысокую механическую прочность в целом: происходит «разрыхление».

При температуре обжига 950°C происходит процесс припекания, т.е. создаются и увеличиваются контакты между частицами, но замкнутых пор еще не образуется. При температуре обжига 1000°C происходит локальное спекание в объеме отдельных областей и разделение этих областей внутренними пустотами. При температуре обжига 1050°C образуется аморфная (стек-

лообразная) фаза в материале, что приводит к образованию и зарастанию замкнутых пор, а также увеличению контактов между частицами. Уменьшение пористости происходит одновременно за счет уменьшения количества пор и уменьшения их объема. Но образующейся при обжиге аморфной (жидкой) фазы недостаточно для упрочнения этих контактов [1, 7].

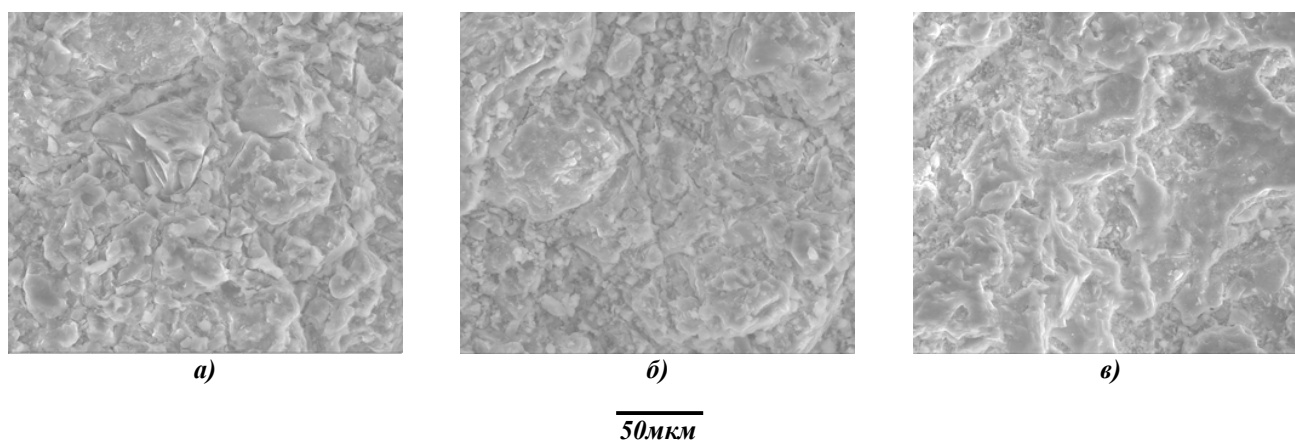


Рисунок 1 – Фотографии керамического кирпича (при увеличении в 1000 раз), полученного на основе исходного состава при различной температуре обжига: а – 950°C; б – 1000°C; в – 1050°C

Из вышеперечисленного следует, что наибольшими прочностными характеристиками будет обладать керамический кирпич, полученный при температуре обжига 1050°C. Это подтверждается ранее проведенными экспериментальными исследованиями, представленными в таблице 1. Поскольку наибольший интерес для целей исследования представляют именно прочностные характеристики для изучения воздействия олеата натрия и стеклобоя на формирование структуры керамического материала были отобраны составы, полученные при этой температуре обжига. Фотографии структуры материала, модифицированного введением добавок, представлены на рисунке 2.

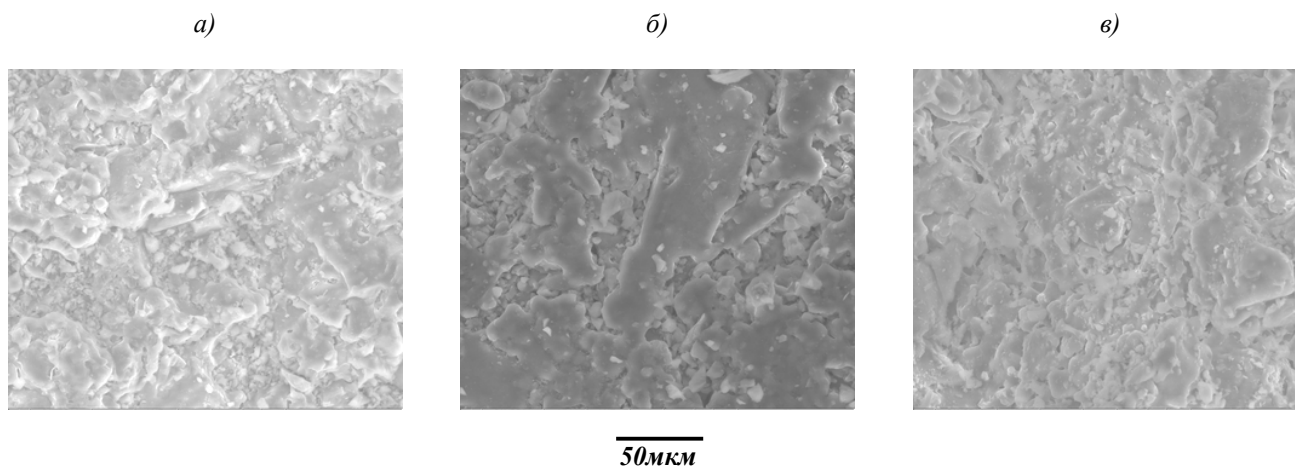


Рисунок 2 – Фотографии керамического кирпича (при увеличении в 1000 раз), обожженного при 1050°C и модифицированного введением добавок: а – ПАВ; б – стеклобой; в – ПАВ и стеклобой

В соответствии с данными фотографий, представленными на рисунке 2, структура рассматриваемого материала представляет собой чередование упорядоченных областей кристаллического строения и неупорядоченных областей аморфного строения. Кристаллические области представлены набором несимметричных групп частиц слоистой структуры, объединенных в агломераты (комплексы), между которыми находится аморфная (стеклообразная) фаза, и представляющих собой пространственный каркас материала. При этом сохраняется внутренняя пористость материала, обеспечиваемая пустотами и разрывами в структуре [9].

Присутствие ПАВ в шихте (рисунок 2, а) приводит к перераспределению твердых и стеклообразных фаз в объеме материала. Кроме того, добавка способствует рекристаллизации – увеличению размеров зерен – крупные зерна, имеющие, как правило, вогнутые границы поглощают мелкие зерна. При этом следует учитывать, что влияние ПАВ на структурообразование керамического кирпича происходит в основном при низких температурах, а значит на начальных стадиях технологического процесса – при приготовлении шихты и формовании. ПАВ адсорбируется на поверхности частиц материала, разделяя их агломераты, и препятствует их коагуляции. ПАВ снижает поверхностное натяжение жидкости, благодаря чему вода обволакивает поверхность частиц шихты, уменьшая силы трения между ними. Это облегчает перемещение частиц друг относительно друга, что повышает однородность материала при перемешивании и увлажнении, а также позволяет достичь высокой степени уплотнения при прессовании. Благодаря этому происходит равномерное распределение компонентов шихты по объему материала и увеличивается поверхность контакта частиц [1].

При нагреве до температуры 200-400°C происходит выгорание органической составляющей ПАВ с выделением активных ионов натрия, вступающих в реакции твердофазного синтеза с минеральной составляющей глины, что приводит к образованию новых аморфных фаз преимущественно в точках контакта между частицами. Это приводит к возникновению внутреннего давления, которое при высоком содержании ПАВ приводит к трещинообразованию в объеме изделия [1, 9].

Введение стеклобоя в состав материала (рисунок 2, б) способствует образованию большего количества аморфной фазы. Стеклообразная фаза растекается по поверхности твердых частиц, выполняя роль связки, цементирующей частицы твердой фазы. Кроме того, стеклообразная фаза заполняет пустоты между частицами, снижая пористость. Таким образом, стеклобой участвует в формировании структуры материала при высоких температурах, то есть на завершающей стадии технологического процесса – при обжиге. Начиная с 700°C щелочные оксиды (Na_2O , K_2O), находящиеся в глине и в стекольном бое, вступают во взаимодействие с другими компонентами, образуя расплав, количество которого возрастает с повышением температуры. В интервале температур 800-1050°C наблюдается распад продуктов дегидратации на отдельные оксиды ($\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 , Fe_2O_3 и др.) с образованием жидкой фазы, в состав которой также переходит стеклообразная фаза, содержащая оксиды Na_2O , K_2O , MgO и CaO [1, 9].

Совместное введение ПАВ и стеклобоя (рисунок 2, в) позволяет получить хорошо спеченный керамический кирпич с однородной структурой. Подобный эффект достигается за счет того, что добавки оказывают влияние на процессы структурообразования на протяжении всего технологического цикла.

Характер поверхностных слоев структуры керамического материала исследуемых составов был изучен методом атомно-силовой микроскопии на зондовой нанолaborатории Ntegra Aura в контактном режиме сканирования поверхности. Из-за сильно развитого рельефа поверхности (многочисленные сколы, разломы, и перепады высот более 10 мкм) возникли сложности в получении крупномасштабных снимков. Кроме того, поверхность керамического материала вне зависимости от состава имела схожий характер. Поэтому результаты исследования представлены в виде 3D АСМ изображений поверхности керамического материала, состав которого модифицирован ПАВ и стеклобоем (рисунок 3).

Как видно из рисунка 3, структура материала носит слоистый характер и разнонаправлена для каждого склона, что свидетельствует о высокой шероховатости поверхности материала. Это способствует распространению жидкой фазы при спекании по механизму растекания, что способствует ускорению процесса спекания [9].

На основании проведенных исследований структуры керамического материала можно сделать вывод о повышении прочностных характеристик за счет повышения степени гомогенизации и уплотнения готовых изделий за счет жидкофазного спекания. Жидкофазное спекание также позволяет снизить температуру обжига и ускорить процесс уплотнения [9].

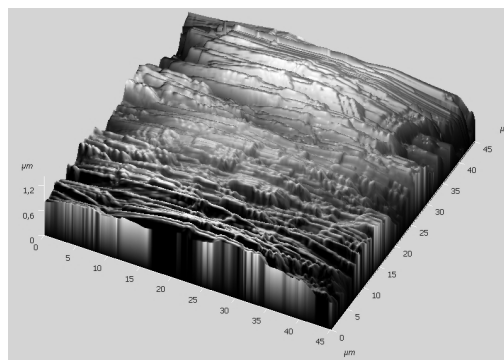


Рисунок 3 – Рельеф поверхности модифицированного керамического материала после обжига

Следовательно, разработанный состав шихты и подобранные технологические режимы производства позволяют улучшить качество керамического кирпича на основе исследуемой кислой глины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Августинник, А.И. Керамика [Текст] / А.И. Августинник. – М.: Промстройиздат, 1957. – 484 с.
2. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / Учебное пособие для вузов. 2-е издание, переработанное и дополненное [Текст] / К.К. Стрелов, И.Д. Кашеев. – М.: Металлургия, 1996. – 608 с.
3. Ястребова, С.А. Зависимость свойств керамических изделий от состава и технологических параметров [Текст] / С.А. Ястребова, А.И. Христофоров // Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – №9. – С. 32-36.
4. Ястребова, С.А. Применение модифицирующей добавки «Гретекол-П» для производства керамического кирпича на основе тощей глины [Текст] / С.А. Ястребова, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – №5. – С. 24-35.
5. Жуков, А. Д. Современные строительные материалы [Текст] / А.Д. Жуков. – М.: Стройинформ, 2007. – 720 с.
6. Крылов, Б.А. Состояние современного строительства и строительной науки [Текст] / Б.А. Крылов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. – №5. – С. 6.
7. Макишева, Е.А. Современное строительство с современными добавками [Текст] / Е.А. Макишева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – №12. – С. 16.
8. Худяков, В.А. Современные композиционные строительные материалы [Текст] / В.А. Худяков, А.П. Прошин, С.Н. Кислицына. – М.: АСВ. – 2007. – 220 с.
9. Бурлаков, Г.С. Основы технологии керамики и искусственных пористых заполнителей: учебник для вузов [Текст] / Г.С. Бурлаков. – М.: Высшая школа, 1972. – 424 с.

Христофоров Александр Иванович

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химическая технология стекла и керамики»
Тел.: +7-920-929-01-82
E-mail: khristoforov@mail.ru

Христофорова Ирина Александровна

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая технология стекла и керамики»
Тел.: +7-910-774-54-26
E-mail: khristoforova-i@mail.ru

Пикалов Евгений Сергеевич

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
Аспирант кафедры «Химическая технология стекла и керамики»
Тел.: +7-904-590-72-84

Кутровская Стелла Владимировна

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
Младший научный сотрудник кафедры «Физика и прикладная математика»
Тел.: +7-915-769-99-85
E-mail: kstel1a@mail.ru

KHRISTOFOROV A.I., KHRISTOFOROVA I.A., PIKALOV E.S.,
KUTROVSKAYA S.V.

INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF CERAMICS FOR STRENGTH CHARACTERISTICS OF CERAMIC BRICK

In the article suggest the patterns of formation and structural changes of ceramic material on base raw with low contents of the oxides aluminum (less 13%) at different firing temperature and the filling of the raw mixture modifying agents. Assessed the influence of structure on the strength characteristics, confirmed by experimental data and correlated with the theoretical concepts of structure formation during sintering. Presented by the visual representation of the structure of the material in the form of photographs obtained by scanning electron and atomic force microscopes.

Keywords: waste of glass, superficially active substances, transfer mixture, structure, sintering, solid phase, amorphous phase, electron-microscopic studies.

BIBLIOGRAPHY

1. Avgustinnik, A.I. Keramika [Tekst] / A.I. Avgustinnik. – M.: Promstrojizdat, 1957. – 484 s.
2. Strelov, K.K. Teoreticheskie osnovy tehnologii ognepornyh materialov / Uchebnoe posobie dlja vuzov. 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe [Tekst] / K.K. Strelov, I.D. Kaweev. – M.: Metallurgija, 1996. – 608 s.
3. Jastrebova, S.A. Zavisimost' svojstv keramicheskikh izdelij ot sostava i tehnologicheskikh parametrov [Tekst] / S.A. Jastrebova, A.I. Hristoforov // Ognepory i tehnikeskaja keramika. – 2006. – №9. – S. 32-36.
4. Jastrebova, S.A. Primenenie modifitsirujuwej dobavki «Greterol-P» dlja proizvodstva keramicheskogo kirpicha na osnove towej gliny [Tekst] / S.A. Jastrebova, I.A. Hristoforova, A.I. Hristoforov // Izvestija VUZov. Stroitel'stvo. – 2008. – №5. – S. 24-35.
5. Zhukov, A. D. Sovremennye stroitel'nye materialy [Tekst] / A.D. Zhukov. – M.: Strojinform, 2007. – 720 s.
6. Krylov, B.A. Sostojanie sovremennogo stroitel'stva i stroitel'noj nauki [Tekst] / B.A. Krylov // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. – 2010. – №5. – S. 6.
7. Makisheva, E.A. Sovremennoe stroitel'stvo s sovremennymi dobavkami [Tekst] / E.A. Makisheva // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. – 2005. – №12. – S. 16.
8. Hudjakov, V.A. Sovremennye kompozicionnye stroitel'nye materialy [Tekst] / V.A. Hudjakov, A.P. Proshin, S.N. Kislicyna. – M.: ASV. – 2007. – 220 s.
9. Burlakov, G.S. Osnovy tehnologii keramiki i iskusstvennyh poristyh zapolnitelej: uchebnik dlja vtuzov [Tekst] / G.S. Burlakov. – M.: Vysshaja shkola, 1972. – 424 s.

Hristoforov Alexander Ivanovich

Vladimir state university, Vladimir

Doctor of technical science, professor, head of department «Chemical technology of glass and ceramics»

Ph.: +7 920 929 01 82

E-mail: khristoforov@mail.ru

Hristoforova Irina Aleksandrovna

Vladimir state university, Vladimir

Doctor of technical science, professor of department «Chemical technology of glass and ceramics»

Ph.: +7 910 774 54 26

E-mail: khristoforova-i@mail.ru

Pikalov Evgenie Sergeevich

Vladimir state university, Vladimir

Post-graduate student of department «Chemical technology has flown down also ceramics»

Ph.: +7-904-590-72-84

Kutrovskaja Stella Vladimirovna

Vladimir state university, Vladimir

Younger scientific employee of department «Physics and the applied mathematics»

Ph.: +7-915-769-99-85

E-mail: kstel1a@mail.ru

ЧЕРНИКОВ С.А., ГОРЯЧЕВ М.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ШВАХ МОНОЛИТНЫХ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Разработано устройство, имитирующее воздействие самолета на конструкцию аэродромного покрытия с целью экспериментальных исследований влияния коэффициента динамического удара на деформации, а также на напряжения, возникающие при ударе для сравнительного анализа ударной прочности существующих битумно-полимерных материалов. Теоретически получены формулы определения величин динамических деформаций, напряжений и усилий, возникающих в герметизирующем материале от величины статической деформации, от когезионной прочности и геометрических размеров шва. Исследовано хрупкое разрушение битумно-полимерных материалов с увеличением скорости деформации. Экспериментально доказано, что ударная вязкость разрушения герметизирующего материала тесно связана с показателями прочности и относительного удлинения.

Ключевые слова: динамический удар, ударная вязкость, монолитные цементобетонные покрытия, герметизирующий материал.

Явление удара на герметизирующий материал происходит при проезде автотранспортного средства или посадке летательного аппарата в том случае, когда скорость рассматриваемой части материала и соприкасающихся с ней частей конструкции монолитного цементобетонного покрытия изменяется в очень короткий период времени. Это происходит вследствие вертикального перемещения плит покрытия.

Особенно данное явление выражено при посадке тяжелого летательного аппарата (самолета). В этом случае происходит касание воздушного судна с некоторой высоты на плиты аэродромного покрытия и погружение их в основание; касание самолета происходит почти мгновенно, вызывая удар, так как последний очень быстро останавливается при соприкосновении с покрытием. Во время удара между ударяющимися телами (шасси самолета и плитами покрытия) возникают весьма большие взаимные давления. Вертикальная скорость ударяющего летательного аппарата за очень короткий промежуток времени изменяется и в частном случае падает до нуля; тело останавливается (по отношению к покрытию). Значит, на покрытие от ударяемого самолета передаются очень большие ускорения, направленные в сторону, обратную его приземлению, т.е. передается реакция P_c , равная произведению массы ударяющего самолета на это ускорение.

Обозначая это ускорение через a , можно написать, что реакция $P_c = Qa/g$, где Q – вес ударяющего шасси самолета. По закону равенства действия и противодействия на ударяемую часть конструкции покрытия передается такая же сила, а затем на герметизирующий материал, но обратно направленная (рисунки 1 а, б). Эта сила и вызывает напряжения в герметизирующем материале.

Таким образом, в ударяемой части конструкции деформационного шва возникают такие напряжения, как будто к ней была приложена сила инерции ударяющего тела; мы можем вычислить эти напряжения, рассматривая силу инерции P_c как статическую нагрузку на герметизирующий материал в деформационном шве покрытия. Затруднение заключается в вычислении этой силы инерции. Продолжительности удара, т.е. величины того промежутка времени, в течение которого происходит падение скорости до нуля, мы не знаем. Поэтому остается неизвестной величина ускорения a , а стало быть, и силы P_c . Таким образом, хотя вычисление напряжений, возникающих в герметизирующем материале при ударе, представляет собой частный случай задачи сил инерции, однако для вычисления силы P_c и связанных

с ней напряжений и деформаций в герметике приходится применять иной прием и пользоваться законом сохранения энергии.

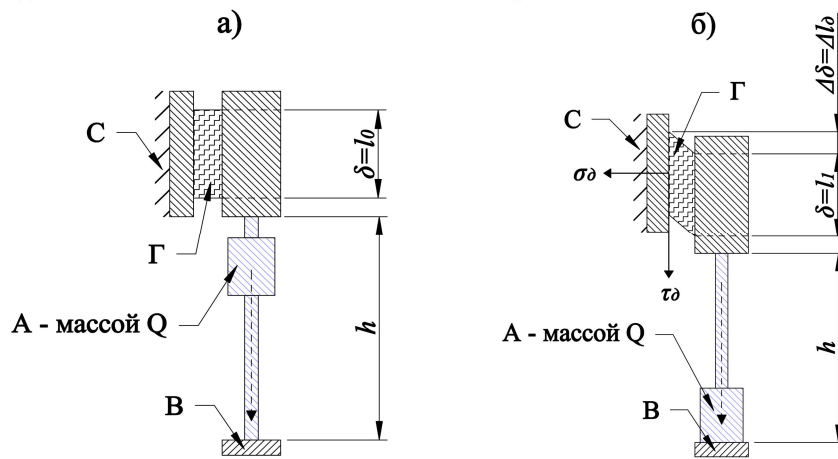


Рисунок 1 – Динамическая модель ударного нагружения

При ударе происходит очень быстрое превращение одного вида энергии в другой: кинетическая энергия ударяющего шасси самолета превращается в потенциальную энергию деформации деформационного шва.

Целью определения ударной вязкости герметизирующих материалов при динамических нагрузках является исследования причин образования битумно-полимерной крошки на цементобетонных покрытиях из-за разрушения герметика и получения сравнительного анализа сопротивления к ударным нагрузкам существующих битумно-полимерных материалов.

Для экспериментальных исследований влияния коэффициента динамического удара на деформации, а также на напряжения, возникающие при ударе, использовали устройство, имитирующее воздействие самолета на конструкцию аэродромного покрытия (см. рисунок 1, а).

Предположим, что очень жесткое тело А весом Q , деформацией которого можно пренебречь, падая с некоторой высоты h , ударяет по другому телу В, прикрепленному на упругую систему С, которая в свою очередь по стержню передает удар на герметизирующий материал Г (см. рисунок 1, б). В частном случае это падение груза на ограничение (упор) стержня, другой конец которого закреплен (продольный удар) на одной стороне цементобетонного образца, имитирующего деформационный шов покрытия. Аналогично можно смоделировать падение груза на балку, лежащую на опорах (изгибающий удар), и т.п.

В течение очень короткого промежутка времени упругопластическая система Г испытывает некоторую деформацию. Обозначим через $\Delta\delta$ перемещение тела Г (местной деформацией металлического стержня пренебрежем) в направлении удара. В упомянутом частном случае при продольном ударе за перемещение $\Delta\delta$ соответственно нужно считать продольную деформацию герметизирующего материала Δl_0 , в ударяемом сечении. В результате удара в системе Г возникнут напряжения P_δ (нормальные напряжения σ_δ или касательные τ_δ — в зависимости от вида деформации).

Динамическая нагрузка определяется действующим на данный материал импульсом силы $I_Q = Q\Delta t$, где Q — сила, с которой оказывается воздействие на материал; Δt — промежуток времени, в течение которого оказывается это воздействие.

Смоделировать на экспериментальном приборе величину импульса силы, которая происходит в реальных условиях очень сложно, поскольку время воздействия на материал Δt исчисляется долями секунд, поэтому в лабораторных условиях можно только изучить поведение материала от воздействия ударной нагрузки и произвести сравнительный анализ существующих битумно-полимерных материалов.

В результате удара груза о платформу она приобретает скорость v , а образец растягивается на некоторую величину либо разрушается

$$\Delta l_{\partial} = l_1 - l_0, \quad (1)$$

где l_1 – длина образца материала в конечный момент его растяжения.

При этом в материале возникают нормальные σ_{∂} и касательные τ_{∂} напряжения, которые деформируют образец на величину Δl_{∂} .

Работа обусловлена кинетической энергией, которая возникла переходом из потенциальной энергии платформы и груза на высоте h до растяжения образца. Таким образом, выражение для работы представится как:

$$\frac{(m_n + m_z)v^2}{2} + (m_n + m_z)g \cdot \Delta l = Q \cdot \Delta l_{\partial}. \quad (2)$$

Скорость v определяется из закона сохранения импульса системы «груз-платформа», считая удар абсолютно неупругим.

Если в статическом положении груз и платформа не вызывают существенное растяжение образца, то Q можно считать приблизительно равной Q_{∂} . В реальных условиях возможно разрыв герметизирующего материала происходит при неоднократном приложении динамической нагрузки, т.е. при многократном ее повторении. Энергия (работа) разрыва материала:

$$W_{раз} = N \cdot Q_{\partial} \cdot \Delta l_{\partial}, \quad (3)$$

где N – число повторений, осуществляемых до момента разрыва.

Рассмотрим случай, когда величина Δl_{∂} соответствует началу разрыва, т.е. соотношение массы груза и высоты его подъема обеспечивает их минимальное значение, при котором произойдет разрыв образца. При этом скорость растяжения образца в момент разрыва равна нулю, а начальная скорость была равна v .

При рассмотрении случая упругопластических деформаций, растяжение образца можно считать равнозамедленным. Из этого следует, что:

$$\Delta l_{\partial} = \frac{v \cdot \Delta t}{2}, \quad (4)$$

$$h = v_0 \cdot t + \frac{g \cdot \Delta t^2}{2}. \quad (5)$$

Поскольку в данном случае начальная скорость груза будет равна нулю, то:

$$\Delta t = \frac{\sqrt{2h}}{g} = 0,45\sqrt{h}, \quad (6)$$

При этом следует заметить, что Δt – это время падения груза с высоты h , а время разрушения герметика намного меньше.

Учитывая вышеизложенное, за величину динамической вязкости можно принять или высоту падающего груза, или количество ударов, или массу падающего груза. Одного из этих показателей достаточно для оценки сопротивления битумно-полимерных материалов динамической нагрузке.

Выражая статическое разрушение полимерно-битумного герметика (рис. 2) через затраченную работу, получим работу (энергию), затраченную на разрушение герметизирующего материала при растяжении, Дж:

$$A_{раз}(W_{раз}) = Q \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

$$\text{а } \Delta l = l_1 - l_0, \quad (8)$$

где Q – сила, приложенная к образцу для его растяжения, кН; Δl – абсолютное удлинение образца, м; l_0 – первоначальная ширина шва образца до растяжения, м; l_1 – конечная ширина шва образца в момент разрыва, м.

Относительное удлинение образца определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{(l_1 - l_0)}{l_1}; \text{ отсюда } \varepsilon \cdot l_1 = l_1 - l_0 = \Delta l, \quad (9)$$

где l_1 – первоначальная толщина герметика в образце шва, равная, м; l_0 – толщина герметика в образце шва в момент его разрыва или отслоения от бетонной балочки, м.

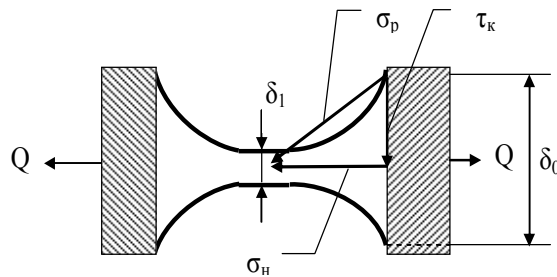


Рисунок 2 – Схема статического растяжения герметизирующего материала

Напряжение, при котором происходит разрыв герметика:

$$\sigma_n = \frac{Q}{S}, \text{ следовательно, } Q = \sigma_n \cdot S \quad Q = \sigma_n S, \quad (10)$$

где S – площадь образца в сечении определения напряжений, м^2 .

Подставив выражение (9), (10) в формулу (7), получим работу (энергию), затраченную на разрушение герметизирующего материала:

$$A_{\text{раз}}(W_{\text{раз}}) = \sigma_n \cdot L_{\text{обр}} \cdot \delta_{\text{обр}} \cdot \varepsilon \cdot l_1, \quad (11)$$

где $L_{\text{обр}}$ – длина образца герметика, м; $\delta_{\text{обр}}$ – ширина образца герметика, м.

В тоже время, потенциальная энергия равна кинетической энергии и равна работе (энергии), затраченной на разрушение герметизирующего материала при растяжении $W_{\text{пот}} = W_{\text{кин}} = A_{\text{раз}}(W_{\text{раз}})$, т.е.

$$m_z \cdot g \cdot h = \frac{m_z \cdot v^2}{2} = \sigma_n \cdot L_{\text{обр}} \cdot \delta_{\text{обр}} \cdot \varepsilon \cdot l_1, \quad (12)$$

По выражению работы (энергии) на разрушение герметика (7) не сложно вычислить напряжение возникающие при динамическом ударе, учитывая, что нормальные напряжения σ_n , возникающие при статическом разрыве будут соответствовать динамическим σ_d :

$$\sigma_d = \frac{m_z \cdot g \cdot h}{L_{\text{обр}} \cdot \delta_{\text{обр}} \cdot \varepsilon \cdot l_1}, \quad (13)$$

При испытаниях образцов на относительное удлинение ГОСТ 30740-2000 [1] известно, что $L_{\text{обр}} = 0,20$ м; $\delta_{\text{обр}} = 0,04$ м; $l_1 = 0,013$ м; $\varepsilon = 5$ (500%) при температуре -20°C . В поставленном эксперименте масса груза m_z на устройстве 0,5 кг; высота падения груза 0,5 м; ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$, следовательно напряжение, при динамическом ударе составит 4,72 МПа, что во много раз больше, чем при статическом нагружении.

Также экспериментально установлено, что диапазон условной когезионной прочности практически всех битумно-полимерных герметизирующих материалов составляет от 0,35 до 0,5 МПа, а адгезионной прочности несколько выше. Зная эти параметры, можно охарактеризовать отношение динамической энергии разрушения к статической, а также вычислить количество ударов на установке, приходящихся на единицу поперечного сечения герметизирующего материала до разрушения.

Опыты с определением модуля упругости по наблюдениям над упругопластическими деформациями герметизирующего материала при различных температурах (рисунок 3) показывают, что и при динамическом действии нагрузок закон Гука остается в силе и модуль упругости сохраняет свою величину. Что касается характера нарастания напряжений и деформаций, то и при ударе деформация происходит, хотя и быстро, но не мгновенно; продольная деформация герметизирующего материала Δl_d постепенно растет в течение очень короткого промежутка времени от нуля до значения веса, например, самолета; параллельно росту деформаций возрастают и нормальные напряжения.

Обобщая сказанное выше, можем наметить следующий общий прием решения задач на определение напряжений при ударе, возникающих в битумно-полимерных материалах деформационных швов аэродромного покрытия. С этой целью необходимо:

- 1) вычислить кинетическую энергию ударяющего шасси летательного аппарата;
- 2) вычислить потенциальную энергию W_c герметизирующего материала, воспринимающего удар. В этом случае потенциальная энергия должна быть выражена через нормальное (σ_δ) и касательное напряжения (τ_δ), возникающие в сечении испытываемого образца, через относительное удлинение или через силу инерции P_δ ударяющего летательного аппарата;
- 3) приравнять величины $W_{к\delta}$ и W_c и из полученного уравнения найти динамическое напряжение σ_δ , деформацию Δl_δ или силу P_δ .

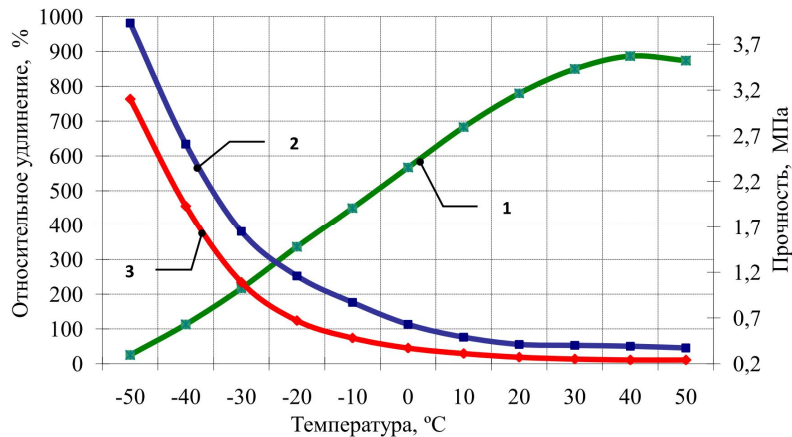


Рисунок 3 – Зависимость относительного удлинения и модуля упругости от температуры:
1 – относительное удлинение; 2 – адгезионная прочность; 3 – условная когезионная прочность

Описанный общий прием расчета на удар предполагает, что вся кинетическая энергия ударяющего тела целиком переходит в потенциальную энергию деформации упруго-пластической системы, т.е. герметизирующего материала. Это предположение не точно. Кинетическая энергия транспортного средства при проезде или летательного аппарата при посадке частично превращается в тепловую энергию шасси плит цементобетонного покрытия, энергию коробления покрытия, а также энергию неупругой деформации основания, на которое опирается конструкция покрытия.

Вместе с тем при высоких скоростях касания (приземления) деформация за время удара не успевает распространиться на весь объем ударяемого искусственного покрытия и в местах приземления возникают значительные местные напряжения, иногда превосходящие предел текучести материала. Подобное же явление может иметь место даже и в том случае, когда вертикальная скорость перемещения автомобиля или летательного аппарата мала, но жесткость основания искусственного покрытия очень высокая. Эти явления можно наблюдать при отрицательных температурах (ниже -7°C), когда основание искусственного покрытия становится жестким.

Однако у некоторых видов битумно-полимерных материалов с увеличением скорости деформации наблюдается склонность к хрупкому разрушению. Это явление можно объяснить с точки зрения структурных связей полимеров, входящих в состав герметиков, которые при высоких скоростях нагружения не успевают произвести перестройку структуры. Переход к хрупкому разрушению поясняется диаграммой (рисунок 4), на которой проведены линии хрупких разрушений АВ и вязких разрушений CD. При увеличении скорости растяжения образцов кривая деформации 4 поднимается выше. Если подъем кривой будет таким, что она пересечет линию АВ, то происходит хрупкое разрушение (кривая 5). Испытания образцов производили при температуре $+20^\circ\text{C}$.

С понижением температуры ударная вязкость падает, причем при некоторой температуре, называемой критической температурой хрупкости, наблюдается резкое падение удар-

ной вязкости. Критическая температура хрупкости служит косвенным показателем склонности материала к хрупкому разрушению: чем ниже эта температура, тем меньше склонность к хрупкому разрушению герметизирующего материала. На рис. 5 кривые 1-4 характеризуют относительное удлинение и условную когезионную прочность образцов битумно-полимерного герметика при различной скорости растяжения. Из графика кривых отчетливо просматривается, что относительное удлинение до момента разрыва уменьшается, а условная когезионная прочность растет пропорционально скорости растяжения. При пересечении кривой АВ, также как и в предыдущем эксперименте, разрыв происходил при 40% относительном удлинении.

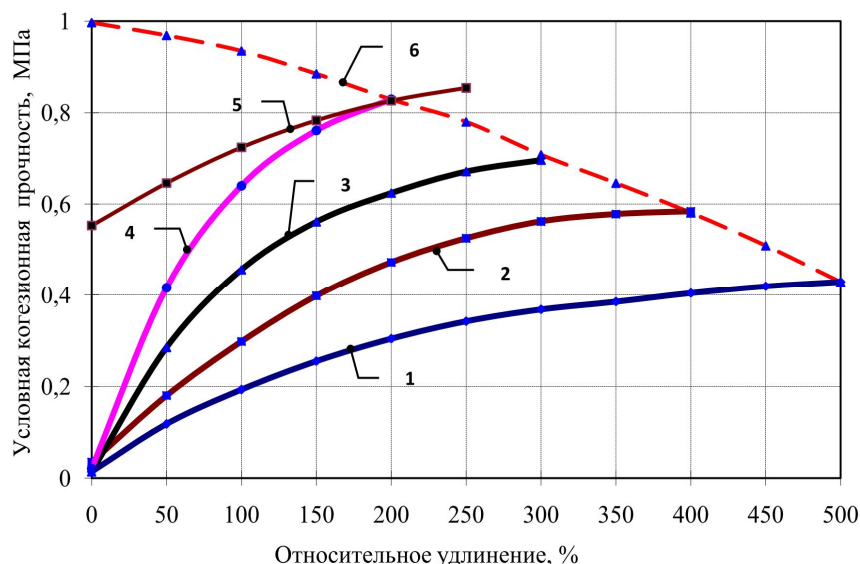


Рисунок 4 – Зависимость относительного удлинения и условной когезионной прочности от скорости растяжения образца при температуре +20°C: 1 – скорость растяжения – 20 мм/с; 2 – скорость растяжения 10 мм/с; 3 – скорость растяжения 5 мм/с; 4 – скорость растяжения 1 мм/с; 5 – линия хрупких разрушений; 6 – линия вязких разрушений

Ударная вязкость разрушения герметизирующего материала тесно связана с показателями прочности и относительного удлинения. Увеличение когезионной прочности сопровождается снижением деформативности и ударной вязкости разрушения. Это объясняется тем, что у прочных герметизирующих материалов мала энергия, поглощаемая при разрушении, уровень которой определяется величиной упруго-пластических деформаций. Для материалов с высокой когезионной прочностью эффект увеличения прочности существенно перекрывается снижением относительного удлинения, в результате чего ударная вязкость разрушения уменьшается. Герметизирующие материалы низкой и средней когезионной прочностью (0,35-0,45 МПа) при комнатной температуре обычно имеют более высокие значения ударной вязкости, чем с когезионной прочностью более 0,5 МПа. С понижением температуры когезионная прочность растет и при определенных условиях поведение материала низкой и средней прочности становится таким же, как у прочного материала при комнатной температуре. Степень перетира минерального или органического наполнителя герметизирующих материалов является одним из основных параметров микроструктуры. Уменьшение размеров зерен наполнителя позволяет увеличить прочность и относительное удлинение герметиков, поэтому при уменьшении размера наполнителя возрастает ударная вязкость разрушения.

Использование такого метода как контроль процесса диспергирования наполнителей при изготовлении герметизирующих материалов, понижение температуры при применении, которая способствует седиментационной устойчивости расплавленного герметика, позволяет одновременно повысить ударную вязкость разрушения.

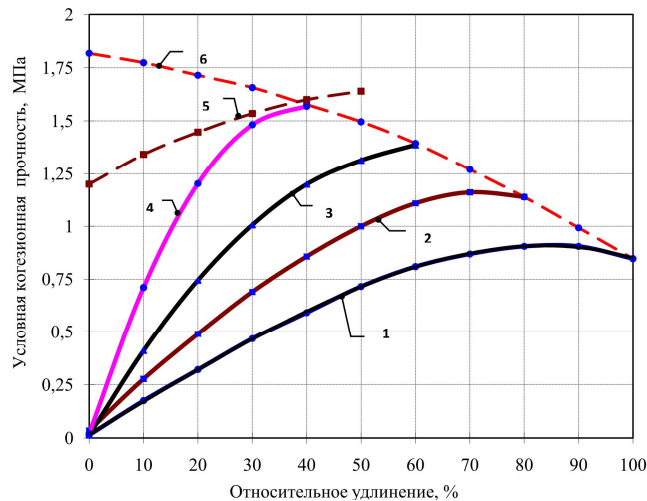


Рисунок 5 – Зависимость относительного удлинения и условной когезионной прочности от скорости растяжения образца при температуре -20°C : 1 – скорость растяжения 20 мм/с ; 2 – скорость растяжения 10 мм/с ; 3 – скорость растяжения 5 мм/с ; 4 – скорость растяжения 1 мм/с ; 5 – линия хрупких разрушений; 6 – линия вязких разрушений

Выводы

Установлено, что воздействие динамической нагрузки на битумно-полимерные композиции вызывают разрушение материала с образованием крошки, хотя при статическом нагружении эти материалы имеют довольно большие относительные удлинения от 75 до 700%, в зависимости от температуры. Методика лабораторных исследований физико-механических показателей, а также долговечности предусматривает испытание только статическим (длительным) нагружением, что не соответствует реальной работе герметизирующего материала в швах покрытий. Это приводит к заведомо завышенным показателям по долговечности материала в швах покрытия.

Для экспериментальных исследований влияния коэффициента динамического удара на деформации, а также на напряжения, возникающие при ударе, разработано устройство, имитирующее воздействие самолета на конструкцию аэродромного покрытия. На этом экспериментальном приборе смоделирована величина импульса силы, которая происходит от воздействия ударной нагрузки и произведен сравнительный анализ ударной прочности существующих битумно-полимерных материалов.

Теоретически были получены формулы определения величин динамических деформаций, напряжений и усилий, возникающих в герметизирующем материале от величины статической деформации, от когезионной прочности и геометрических размеров шва. Теоретически был выведен динамический коэффициент ударной нагрузки, возникающий от воздействия летательного аппарата на герметизирующий материал. Эти формулы могут быть также использованы для исследования ударной прочности композиционных материалов, используемых для ремонта искусственного дорожного или аэродромного покрытия, при определении напряжений в плитах при проезде автомобилей или посадке летательных аппаратов, вызванных резким корблением плит.

Исследовано хрупкое разрушение битумно-полимерных материалов с увеличением скорости деформации. Установлено, что с понижением температуры ударная вязкость падает, причем при некоторой температуре, называемой критической температурой хрупкости, наблюдается резкое падение ударной вязкости. Критическая температура хрупкости служит косвенным показателем склонности материала к хрупкому разрушению: чем ниже эта температура, тем меньше склонность к хрупкому разрушению герметизирующего материала.

Экспериментально доказано, что ударная вязкость разрушения герметизирующего материала тесно связана с показателями прочности и относительного удлинения. Увеличение когезионной прочности сопровождается снижением деформативности и ударной вязкости разрушения. Установлено, что степень перетира минерального или органического наполни-

теля в герметизирующем материале, является одним из основных параметров влияющего на ударную вязкость разрушения.

Дальнейшим направлением ведущихся исследований будет разработка рекомендаций по совершенствованию технологии герметизации швов монолитных цементобетонных покрытий на основе выявленного экспериментальных путем влияния технологических и эксплуатационных факторов на их долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30740-2000. Материалы герметизирующие для швов аэродромных покрытий [Текст]. Общие технические условия, 2001. – 26 с.

Черников Станислав Анатольевич

Международный аэропорт Шереметьево, Московская область, г. Химки

Инженер по эксплуатации аэродромов 1 категории

Тел.: 8-926-776-84-77

E-mail: siriustdi@rambler.ru

Горячев Михаил Геннадьевич

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог»

Тел.: 8-926-776-67-73

E-mail: rudeger@rambler.ru

CHERNIKOV S.A., GORYACHEV M.G.

THE RESEARCH OF IMPACT STRENGTH FEATURES OF SEALING MATERIALS FOR THE ESTIMATION OF THEIR OPERABILITY IN MONOLITHIC CONCRETE LAYER SEAMS

A device that simulates the impact of aircraft on the aerodrome covering is developed. It's done for the purpose of experimental researches of influence of dynamic blow factor on deformation and on the pressure arising from the impact. The results allow to analyze the shock durability of different polymer-bitumen materials. Theoretically obtained formulas of dependence of dynamic deformations, pressure and arising in the containment material efforts, from static deformation, cohesion durability and the weld geometrical dimensions are received. It is investigated the brittle failure of polymer-bitumen materials in dependence of speed deformation increase. It is experimentally proved that the impact viscosity of sealing material destruction is closely linked to the strength and elongation.

Keywords: dynamic impact, impact viscosity, monolithic concrete coating, sealing material.

BIBLIOGRAPHY

1. GOST 30740-2000 Materialy germetiziruyushchie dlya shvov aerodromnyh pokrytiy. Obshchie tehicheskie usloviya, 2001 g. – 26 s.

Chernikov Stanislav Anatolevich

Sheremetyevo International Airport, Moscow region, Khimki

1-st category engineer of airports maintenance

Ph.: 8-926-776-84-77

E-mail: siriustdi@rambler.ru

Goryachev Mikhail Gennadevich

Moscow Automobile and Road Building Technical University (MADI), Moscow

Candidat technical science, the senior lecturer of faculty «Construction and operation of roads»

Ph. 8-926-776-67-73; +7 (495) 155-03-22

E-mail: rudeger@rambler.ru

Уважаемые авторы!

Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки - РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем – 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** - это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unpk.ru

Адрес учредителя журнала

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет –
учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)
302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29
+7 (4862) 42-00-24
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет –
учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)
302020, г. Орел, ул. Московская, 77.
+7 (4862) 73-43-49
www.gu-unpk.ru
E-mail: oantc@mail.ru

Технический редактор С.В. Солопов
Компьютерная верстка С.В. Солопов, Н.В. Первых

Подписано в печать 07.07.2011 г.
Формат 70х108 1/16. Печ. л. 3,21.
Тираж 400 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической
базе ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.