

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФУНДАМЕНТОВ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

Меннанов<sup>1</sup> Э.М., Родин<sup>2</sup> С.В., Калафатов<sup>3</sup> Д.А., Богущкий<sup>4</sup> Ю.Г.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. Институт «Академия строительства и архитектуры»  
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181

E-mail: <sup>1</sup>mennanov.elmar@mail.ru; <sup>2</sup>sv\_rodin@mail.ru; <sup>3</sup>jafer90@mail.ru; <sup>4</sup>bogutskiyyg@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований моделей фундаментов при разрушении по наклонным сечениям и в виде продавливания. Для рационального планирования экспериментов был построен большой комбинационный квадрат, состоящий из 25 средних по величине квадратов, соответствующих всем сочетаниям двух факторов (кубиковой прочности бетона и коэффициенту армирования). Каждый из 25 средних квадратов, в свою очередь, состоит из 25 клеток, соответствующих всем возможным сочетаниям остальных факторов: высоты плиты фундамента и относительному вылету консольной части. Выполнены экспериментальные исследования с крупномасштабными железобетонными моделями фундаментов на песчаном основании, которые позволили изучить параметров совместной работы фундамента и грунта, и установить геометрические и прочностные факторы, играющие важную роль в формировании процесса хрупкого разрушения фундамента (вылет консолей, высота плиты фундамента, армирование, прочность бетона).

**Предмет исследования:** напряженно-деформированное состояние фундаментов под колонны зданий и сооружений при хрупком разрушении системы «основание–фундамент», так как хрупкое разрушение опасно как с точки зрения катастрофического выхода из строя самого фундамента, так и с точки зрения внезапного исчерпания прочности всего сооружения.

**Материалы и методы:** Наши экспериментальные исследования были разделены на два этапа:

1 – проведение постановочных опытов на крупномасштабных железобетонных моделях фундаментов с целью выбора четырех факторов, так как большее число факторов, вводимых в эмпирические формулы, практически не повышает точности формул, а только увеличивает количество и трудоемкость экспериментов;

2 – исследование влияния формы эпюры нормальных контактных напряжений и установленных первичных факторов на прочность при продавливании фундаментов натуральных размеров (2x2 м).

Постановочные экспериментальные исследования проводили по сериям из трех или пяти одинаковых моделей фундаментов размером в плане 1x1x0,1 м (высота) при различных значениях исследуемых факторов. Конструкции фундаментов показаны на рис.1.

**Результаты:** экспериментальное изучение влияния эпюр контактных напряжений песчаного грунта на прочность натуральных столбчатых фундаментов при продавливании; выявление реальных форм пирамиды продавливания на натуральных железобетонных образцах фундаментов; разработка методики расчета прочности при хрупком разрушении столбчатых фундаментов на песчаном основании; получение математических зависимостей разрушающей нагрузки от параметров конструкции фундаментов; новые конструктивные решения фундаментов.

**Выводы:** на основе статистической обработки результатов экспериментальных исследований, выполненных по комбинационному квадрату, получена эмпирическая формула расчета прочности, расчеты по которой для фундаментов, разрушившихся от продавливания, наиболее точно согласуются с экспериментальными данными. Полученная формула может быть рекомендована как экспресс-метод оценки прочности фундамента.

**Ключевые слова:** фундамент, основание, грунт, исследование, планирование, железобетон.

### ВВЕДЕНИЕ

Проведение исследований на моделях фундаментов, выполненных С.В.Родиным [17] позволило выявить четыре наиболее важных фактора, определяющих прочность железобетонных фундаментов при разрушении по наклонным сечениям и в виде продавливания: гибкость конструкции (высота плиты фундамента и вылет консоли), прочность бетона, содержание продольной рабочей арматуры.

В качестве рациональной последовательности значений отмеченных факторов была выбрана арифметическая прогрессия, т.к. она позволяла сохранить подобие рядов образцов, и в то же время ограничиться минимальным числом вариантов значений факторов. Принятые значения факторов охватывали основные, встречающиеся в практике

проектирования, и теоретически возможные случаи конструирования фундаментов, рассматривали даже бетонные образцы. Учитывалась также прогрессивная тенденция к применению в конструкциях, взаимодействующих с грунтом, материалов с повышенными прочностными характеристиками, увеличенной гибкости.

Если каждый из этих переменных факторов будет принимать пять разных значений, то для проведения намеченных исследований влияния четырех факторов потребовалось бы осуществить 625 различных опытов, не считая повторных при каждом испытании.

Если принять к сведению еще сравнительно значительный разброс данных, неизбежных при исследованиях фундаментов, характеризуемым коэффициентом вариации около 20–25%, то для получения средних величин со степенью достоверности 95% следовало каждый отдельный

эксперимент повторить не менее 3–5 раз, т.е. провести 3125 опытов.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Вопрос о распределении нормальных контактных напряжений по подошве фундаментов имеет огромное практическое значение, так как эпюра нормальных контактных напряжений (проекция пространственного поля напряжений в массиве грунта на контактную поверхность) является по существу внешней нагрузкой на фундамент. По изменениям эпюры нормальных контактных напряжений можно судить об изменениях пространственного напряженно-деформированного состояния системы «основание–фундамент», по-этому рядом исследователей были поставлены опыты по изучению распределения нормальных контактных напряжений.

Экспериментальные исследования совместной работы грунтового основания и фундамента проводились и проводятся по трем основным направлениям: 1 – исследование послойных деформаций грунта под фундаментом и деформации поверхности основания в окрестности фундамента [8, 22]; 2 – изучение прогибов, напряжений, осадок конструкции фундамента и косвенный переход (используя различные модели грунтового основания) к определению контактных напряжений [5, 16]; 3 – непосредственное измерение нормальных контактных напряжений [1, 2, 4, 10].

В нашем обзоре акцентировано внимание на третьем направлении, получившем в последнее время преимущественное распространение благодаря совершенствованию техники измерительной аппаратуры и методики исследований. Значительный вклад в эту область внесли работы отечественных исследователей Н.Н. Давиденкова [4], А.Г. Родштейна [18, 19], Д.С. Баранова [1], Г.Е. Лазебника [6, 7], Ю.Н. Мурзенко [12], ими созданы приборы и испытательные комплексы, позволяющие с высокой достоверностью определять напряжения в грунтовом основании, в том числе контактные, как в модельных, так и в натуральных условиях.

Подробный анализ зарубежных исследований контактных напряжений опубликованы в 1961 г. проф. Э. Шульце [9], куда однако не вошли работы советских исследователей. Поэтому в настоящем обзоре анализируются только важнейшие результаты зарубежных исследований. В ретроспективный обзор отечественных работ включены результаты изучения распределения нормальных контактных напряжений под подошвой отдельно стоящих фундаментов (штампов) мелкого заложения при действии осесимметричных нагрузок, распределенных по концентрированной площади. В соответствии с условным разделением плоскостных конструкций отдельно стоящих фундаментов мелкого заложения на жесткие и гибкие (например, по показателю

гибкости М.И. Горбунова-Посадова [3]) аналитический обзор содержит две части.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чтобы ускорить исследования и не поступиться точностью получаемых зависимостей, была применена методика рационального планирования экспериментов, разработанная проф. М.М. Протодяконовым [14] и развитая в работе [15].

В соответствии с этой методикой был построен большой комбинационный квадрат (рис. 1), состоящий из 25 средних по величине квадратов, соответствующих всем сочетаниям двух факторов (кубиковой прочности бетона  $R$  и коэффициенту армирования  $\mu_s$ ).

Каждый из 25 средних квадратов в свою очередь состоит из 25 клеток, соответствующих всем возможным сочетаниям остальных двух факторов: высоты плиты фундамента и вылету консоли  $h, l_{оп}/l$ .

Согласно методике рационального планирования экспериментов, для каждого из 25 средних квадратов опыты проводятся не при всех 25 возможных сочетаниях двух других факторов, а только при одном, соответствующем отмеченной клетке. Это позволило нам уменьшить потребное количество экспериментов в 25 раз.

Нетрудно заметить, что в средних квадратах отмеченные клетки расположены по-разному, т.к. в каждой строке и каждом из 25 столбцов большого квадрата находится только одна клетка.

класс Величина	В7,5					В15					В25					В30					В40					
	h	16	24	32	40	8	16	24	32	40	8	16	24	32	40	8	16	24	32	40	8	16	24	32	40	
0,0	0,15			1																						
	0,20																									
	0,25																									
	0,30																									
	0,35																									
0,3	0,15																									
	0,20																									
	0,25																									
	0,30																									
	0,35																									
0,6	0,15																									
	0,20																									
	0,25																									
	0,30																									
	0,35																									
0,9	0,15																									
	0,20																									
	0,25																									
	0,30																									
	0,35																									
1,2	0,15																									
	0,20																									
	0,25																									
	0,30																									
	0,35																									

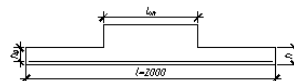


Рис. 1. Комбинационный квадрат  
Fig. 1. Raman Square

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ**

Выбранное расположение клеток обеспечивает при группировке результатов по одному какому-либо фактору нейтрализации влияния трех остальных факторов путем усреднения.

После того, как результаты эксперимента записаны в клетки комбинационного квадрата, производят усреднение полученных результатов по каждому из факторов. Для этого результаты группируются по влияющим факторам и находится среднее арифметическое значение. Если влияние факторов оказывается не в прямой зависимости от результатов эксперимента, а выражается степенной функцией или же не проявляется в результате математических усреднений, находят среднее геометрическое значение результатов по строкам и столбцам квадрата, логарифмируют и затем находят среднее арифметическое значение.

Усредненные величины по каждому фактору наносят на координатную сетку и выделяют среди них такие точки, которые могут быть соединены плавными кривыми. Количество и распределение полученных кривых позволяет предварительно определить вид искомой функции, исключить влияние соответствующих факторов путем вычитания найденных величин или деления на них. В дальнейшем выполняют повторное исследование остаточных факторов. Результатом обработки комбинационного квадрата является эмпирическая формула, в которой учтено влияние факторов на результат.

Конструирование фундаментов натуральных размеров для проведения второго этапа экспериментальных исследований выполнено с учетом рассмотренной методики по комбинационному квадрату (рис. 1).

Экспериментальные исследования с крупномасштабными железобетонными моделями фундаментов на песчаном основании позволили, помимо изучения параметров совместной работы фундамента и грунта, установить геометрические и прочностные факторы, играющие важную роль в формировании процесса хрупкого разрушения фундамента (вылет консолей, высота плиты фундамента, армирование, прочность бетона).

Частью задачи экспериментальных исследований с образцами фундаментов натуральных размеров, являлось изучение взаимовлияния отмеченных факторов на прочность фундаментов по наклонным сечениям и при продавливании.

Произведем усреднение полученных значений разрушающих нагрузок на фундаменты по каждому из первичных факторов. Результаты вычислений приведены в табл. 1 и табл.2.

Нанося полученные средние значения величин факторов на график (рис. 2а), получим зависимости результатов от каждого из факторов в отдельности при средних значениях прочих факторов.

**Таблица 1.** Результаты усреднения факторов  $R$  и  $\mu_s$

**Table 1. Averaging Results  $R$  and  $\mu_s$**

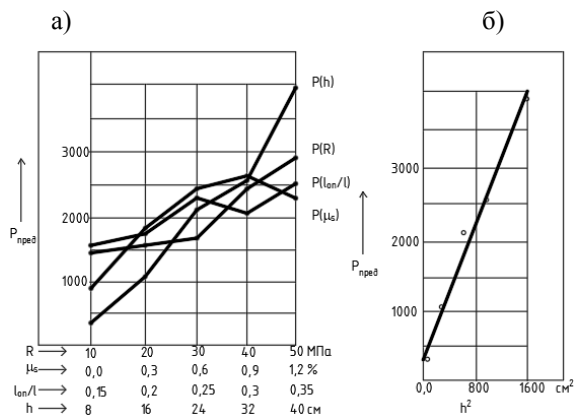
	100	200	300	400	500	Сумма	Среднее
0,0	85	165	114	19	68,5	452	90,3
0,3	134	29	314	138	280	895	179
0,6	355	88,2	44	325	405	1218	244
0,9	134	375	269	498	34	1310	262
1,2	30,5	105	108	245	650	1138	228
Сумма	738,5	762,2	849	1225	1438	5013	—
Среднее	148	152	170	245	288	—	200,3

**Таблица 2.** Результаты усреднения факторов  $h$ ,  $l_{on}/l$ .

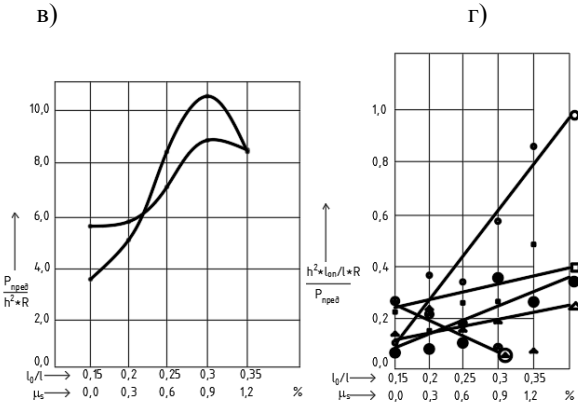
**Table 2. Factor averaging results  $h$ ,  $l_{on}/l$ .**

	8	16	24	32	40	Сумма	Среднее
0,15	34,4	88,2	85	245	314	766,6	153,3
0,2	44,5	68,5	105	134	498	850	170
0,25	19	107,7	280	375	355	1136,6	227,3
0,3	30,5	138,4	269	405	165	1007,9	201,6
0,35	29	134	325	114	650	1252	250,4
Сумма	157,4	536,7	1064	1273	1982	5013	—
Среднее	31,5	107,3	212,8	255	396,4	—	200,5

При этом заметим, что с ростом фактора  $h$  функция  $P$  растет монотонно и быстрее, чем в первой степени, имеется тенденция роста функции  $P$  и с увеличением фактора  $R$ , влияние факторов  $l_{on}/l$  и  $\mu_s$  остается неясным. Проверим зависимость между  $P$  и фактором  $h^2$ . Из графика рис. 2б видно, что функция  $P$  получается практически прямо пропорциональной  $h^2$ . Поэтому для устранения влияния фактора  $h$  пересчитаем все первичные данные, разделив их на  $h^2$ . Затем сгруппируем их по следующему по силе фактору  $R$ . Для нейтрализации этого фактора снова разделим результат на  $R$  (см. рис. 2в).



**Рис. 2.**



**Рис. 2.** Результаты обработки испытаний фундаментов, выполненных по комбинационному квадрату:  
 а – зависимости параметров  $R, \mu_s, l_{on}/l, h$  от  $P_{пред}$ ;  
 б – зависимость  $h^2$  от  $P_{пред}$ ; в, г – результаты усреднения параметров.

**Fig. 2.** Processing results of raman square foundation tests  
 Полученные после второго пересчета данные группируем в табл. 3 по значениям факторов  $l_{on}/l$  и  $\mu_s$ .

**Таблица 3.** Результаты усреднения фактора  $P/h^2R$   
**Table 3.** Factor averaging results  $P/h^2R$

	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	Сумма	Среднее
0,0	1,48	0,54	0,74	0,52	0,73	3,65	0,73
0,3	0,65	1,31	1,0	1,35	0,725	5,0	1,0
0,6	1,72	2,32	2,22	0,8	1,41	8,47	1,7
0,9	1,1	0,78	1,83	1,56	5,23	10,5	2,1
1,2	0,6	0,91	1,4	4,77	0,8	8,48	1,7
Сумма	5,55	5,86	7,19	9,0	8,54	36,1	–
Среднее	1,11	1,17	1,44	1,8	1,71	–	7,23

Нанося эти данные на график рис. 2г, заметим, что все точки вполне удовлетворительно ложатся на плавные кривые, имеющие вид смешанных гипербол [14]. Для того, чтобы найти уравнение таких кривых, их предварительно нужно спрямить. Для кривой подобного типа можно предположить следующий вид уравнения [15]:

$$P_o = \frac{P_m \cdot l_{on}/l}{l_{on}/l + l_{on(0)}/l_{(0)}} \quad (1)$$

или иначе

$$\frac{l_{on}/l + l_{on(0)}/l_{(0)}}{P_m} = \frac{l_{on}/l}{P_o} = \frac{l_{on}/l \cdot R \cdot h^2}{P} \quad (2)$$

Формула (2) – это уравнение прямой линии в координатах  $l_{on}/l$  и  $\frac{l_{on}/l \cdot R \cdot h^2}{P}$

Пересчитаем данные табл. 3, вычисляя обратные величины  $\frac{l_{on}/l \cdot R \cdot h^2}{P}$ , и получим следующие данные (табл. 4).

**Таблица 4.** Результаты усреднения фактора  $P/R \cdot h^2$   
**Table 4.** Factor averaging results  $P/R \cdot h^2$

	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	Сумма	Среднее
0,0	0,1	0,37	0,34	0,58	0,95	2,34	0,468
0,3	0,22	0,15	0,25	0,22	0,48	1,33	0,266
0,6	0,087	0,086	0,1	0,38	0,25	0,903	0,181
0,9	0,14	0,26	0,14	0,19	0,067	0,797	0,159
1,2	0,25	0,22	0,18	0,06	0,44	1,15	0,23
Сумма	0,807	1,086	1,01	1,43	2,187	6,52	–
Среднее	0,16	0,22	0,202	0,286	0,44	–	1,308

Нанося эти данные на график (рис. 2) заметим, что точки на нем с некоторым приближением ложатся вдоль прямых линий. Общее уравнение этих прямых линий получается следующим:

$$\frac{l_{on}/l \cdot R \cdot h^2}{P} = l_{on}/l + \mu_s \quad (3)$$

Откуда

$$P = \frac{l_{on}/l \cdot R \cdot h^2 \cdot 100}{l_{on}/l + \mu_s} \quad (4)$$

где  $R$  – кубиковая прочность бетона, МПа;  
 $h$  – высота плиты, м;

$$\mu_s = \frac{A_s}{b \cdot h_0} \quad (5)$$

В табл. 5 приведены результаты оценки точности расчета предельной прочности фундаментов при продавливании по формуле (4) и опытными значениями продавливающей силы.

Сопоставление величин продавливающих сил, определенных по формулам (4) и (8.87) [21], с экспериментальными значениями показывает, что продавливающие силы, определенные по формуле (4), для фундаментов, разрушившихся от продавливания, более точно соответствуют экспериментальным данным, чем результаты расчета по формуле (8.87) [21] при эпюре нормальных контактных напряжений грунта, принятой по [20].

Поэтому мы рекомендуем формуле (4) использовать в расчетах фундаментов как экспресс-метод определения расчетной несущей способности фундаментов в предположении хрупкого разрушения, например, при вариантном сравнении.

**Таблица 5.** Результаты оценки точности расчета предельной прочности фундаментов при продавливании по формуле (4) и опытными значениями продавливающей силы

**Table 5.** Results of Estimating the Accuracy of Calculating the Ultimate Strength of Foundations at Punching by Formula (4) and Experimental Values of Punching Force

Источник	Таблица 4.1 [17]							[16]	[13]	[11]
	6	9	10	12	14	18	20	22	21Ф	ПС-7
№ испытания	6	9	10	12	14	18	20	22	21Ф	ПС-7
$P_{расч}$ , кН	1105	911	2330	403	1540	1550	218	950	214	360

Продолжение таблицы 5.

$P$ (8.87) [21], кН	818	1014	1650	325	1900	1580	211	775	–	–	–
$P_{оп}$ , кН	1000	1107	2270	805	2180	1950	328	920	180	412	104

## ВЫВОДЫ

1. На основе статистической обработки результатов экспериментальных исследований, выполненных по комбинационному квадрату, получена эмпирическая формула расчета прочности, расчеты по которой для фундаментов, разрушившихся от продавливания, наиболее точно согласуются с экспериментальными данными.

2. Полученная формула может быть рекомендована как экспресс-метод оценки прочности фундамента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Д.С. Измерительные приборы, методика и некоторые результаты исследования распределения давлений в песчаном грунте. – М.: Научное сообщение ЦНИИСК, 1959. Вып. 7. – 60 с.
2. Бараускас Я.А., Ривкин С.А. Экспериментальное определение расчетных параметров естественных грунтов оснований. – Литовский механический сборник № 1. – Вильнюс: Вильнюсский инженерно-строительный институт, 1969. – С. 88-98.
3. Горбунов-Посадов М.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Гос. Изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 516 с.
4. Давиденков Н.Н. Струнный метод измерения деформаций. – Л.-М.: Гос. техн.-теоретич. Изд., 1933. – 60 с.
5. Корнев Б.Г., Ручимский М.Н. Экспериментальные исследования работы моделей плит на грунтовом основании. – М.: Вопросы расчета плит на упругом основании. – Стройиздат, 1958. – С. 5-40.
6. Лазебник Г.Е. Разработка, испытания и усовершенствование датчиков для определения давлений грунта и сыпучих тел на сооружения в натуре. – В кн.: Исследования по основаниям, фундаментам и механике грунтов. – Киев: Будивельник, 1969. – С. 116-123.
7. Лазебник Г.Е., Смирнов А.А. Определение напряжений и деформаций под фундаментами в основаниях из различных грунтов. – В кн.: Исследования по основаниям, фундаментам и механике грунтов. – Киев: Будивельник, 1969. – С. 100-111.
8. Манвелов Л.И., Борташевич Э.С. О выборе расчетной модели упругого основания. – Строительная механика и расчет сооружений, 1961. № 4. – С. 14-18.
9. Мартишюс А.Т. К расчету фундаментных плит переменной толщины на продавливание. – В сб.:

Железобетонные конструкции. – Вильнюс: Вильнюсский инженерно-строительный институт, 1969. – С. 141-147.

10. Мурзенко Ю.Н. Основные закономерности изменения напряженного состояния песчаного основания по контактной по-верхности фундаментов при возрастании нагрузки. – В сб.: Исследования оснований, фундаментов и гидротехнических сооружений. – Новочеркасск: Новочеркасский ПИ, 1970. Т. 216. – С. 3-12.

11. Мурзенко Ю.Н., Цесарский А.А. Влияние заглубления на совместную работу железобетонных фундаментов и песчаного основания. – В сб.: Исследования оснований, фундаментов и гидротехнических сооружений. – Новочеркасск: Новочеркасский ПИ, 1970. Т. 216. – С. 29-35.

12. Мурзенко Ю.Н., Ревенко В.В., Аринина Э.В. Исследование напряженно-деформированного состояния песчаного основания в процессе повышения нагрузки. – В сб.: Экспериментально-теоретические исследования строительных конструкций, оснований и фундаментов. – Новочеркасск: Новочеркасский ПИ, 1974. – С. 61-67.

13. Палатников Е.А., Тепляков А.А. Экспериментальные исследования плит на грунтовом основании. – М.: Труды института ГипроНИИавиапром. Вып. 8. 1971. – С. 76-102.

14. Протодьяконов М.М. Обработка опытных данных по резанию горных пород методом смешанных гипербол. Научные доклады высшей школы. – М.: Горное дело, 1958. № 2. – С. 263-269.

15. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 76 с.

16. Ривкин С.А. Расчет фундаментов. – Киев: Будивельник, 1967. – 304 с.

17. Родин С.В. Особенности силового взаимодействия железобетонных столбчатых фундаментов с песчаным основанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / С.В. Родин. – Днепропетровск, 1983. – 212 с.

18. Родштейн А.Г. Контактные напряжения под жесткими фундаментами на песчаном основании. Информационные материалы. – М.: 1952. № 1. – С. 31-35.

19. Родштейн А.Г. Лабораторные и натурные исследования реактивных давлений под жестким фундаментом. – М.-Л.: Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 111. Госэнергоиздат, 1962. – С. 69-74.

20. Руководство по проектированию фундаментов на естественном основании под колонны зданий и сооружений промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1978. – 109 с.

21. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003». [Текст]. – М.: Минстрой России, 2018. – 143 с.

22. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1976. – 247 с.

## REFERENCES

1. Baranov D.S. Measuring Instruments, Methodology and Some Results of the Study of Pressure Distribution in Sandy Soil. Moscow, TsNIISK Publ., 1959. Vol. 7. – 60 p. (in Russian).
2. Barauskas Y.A., Rivkin S.A. Experimental Determination of Calculated Parameters of Natural Soil Foundations. – Lithuanian Mechanical Collection No. 1. Vilnius: Vilnius Institute of Engineering and Civil Engineering, 1969. P. 88-98.
3. Gorbunov-Posadov M.I. Calculation of structures on an elastic basis. – M.: State. Publishing house of literature on construction and architecture, 1953. – 516 p.
4. Davidenkov N.N. String method of measuring deformations. – L.-M.: State Technical University.-theoretical Publishing House, 1933. – 60 p.
5. Korenev B.G., Ruchimsky M.N. Experimental studies of the operation of models of slabs on a soil base. – M.: Issues of calculating slabs on an elastic base. – Stroyizdat, 1958. – pp. 5-40.
6. Lazebnik G.E. Development, testing and improvement of sensors for determining the pressures of soil and bulk solids on natural structures. – In: Research on foundations, foundations and soil mechanics. – Kiev: Budivelnik, 1969. – pp. 116-123.
7. Lazebnik G.E., Smirnov A.A. Determination of stresses and deformations under foundations in foundations from various soils. – In: Research on foundations, foundations and soil mechanics. – Kiev: Budivelnik, 1969. – pp. 100-111.
8. Manvelov L.I., Bortashevich E.S. On the choice of the calculated model of the elastic base. – Construction mechanics and calculation of structures, 1961. No. 4. – pp. 14-18.
9. Martishus A.T. On the calculation of foundation slabs of variable thickness for punching. – In the collection: Reinforced concrete structures. – Vilnius: Vilnius Institute of Civil Engineering, 1969. – pp. 141-147.
10. Murzenko Yu.N. The main patterns of changes in the stress state of the sandy base along the contact surface of the foundations with increasing load. – In the collection: Studies of foundations, foundations and hydraulic structures. – Novochoerkassk: Novochoerkassk PI, 1970. Vol. 216. – pp. 3-12.
11. Murzenko Yu.N., Tsesarsky A.A. The influence of sinking on the joint work of reinforced concrete foundations and sandy foundations. – In the collection: Studies of foundations, foundations and hydraulic structures. – Novochoerkassk: Novochoerkassk PI, 1970. Vol. 216. – pp. 29-35.
12. Murzenko Yu.N., Revenko V.V., Arinina E.V. Investigation of the stress-strain state of a sandy base in the process of increasing the load. – In the collection: Experimental and theoretical studies of building structures, foundations and foundations. – Novochoerkassk: Novochoerkassk PI, 1974. – pp. 61-67.
13. Palatnikov E.A., Teplyakov A.A. Experimental studies of slabs on a soil base. – M.: Proceedings of the Institute of Engineering and Aviation Industry. Issue 8. 1971. – pp. 76-102.
14. Protodiakonov M.M. Processing of experimental data on rock cutting by the method of mixed hyperboles. Scientific reports of the higher school. – M.: Mining, 1958. No. 2. – pp. 263-269.
15. Protodiakonov M.M., Teder R.I. Methods of rational planning of experiments. – M.: Nauka, 1970. – 76 p.
16. Rivkin S.A. Calculation of foundations. – Kiev: Budivelnik, 1967. – 304 p.
17. Rodin S.V. Features of Power Interaction of Reinforced Concrete Columnar Foundations with a Sand Foundation. ... Cand. Tech. Sci.: 05.23.02 / S.V. Rodin. – Dnepropetrovsk, 1983. 212 p. (in Russian).
18. Rodstein A.G. Contact stresses under rigid foundations on a sandy base. Information materials. – M.: 1952. № 1. – Pp. 31-35.
19. Rodstein A.G. Laboratory and field studies of reactive pressures under a rigid foundation. – M.-L.: Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering. Issue 111. Gosenergoizdat, 1962. – pp. 69-74.
20. Guidelines for the design of foundations on a natural foundation for columns of buildings and structures of industrial enterprises. – M.: Stroyizdat, 1978. – 109 p.
21. SP 63.13330.2018 "Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003". [Text]. – M.: Ministry of Construction of Russia, 2018. – 143 p.
22. Cherkasov I.I. Mechanical properties of soils in road construction. – M.: Transport, 1976. – 247 p.

## PLANNING AN EXPERIMENT IN THE STUDY OF THE FORCE INTERACTION OF FOUNDATIONS WITH A SOIL BASE

Mennanov<sup>1</sup> E.M., Rodin<sup>2</sup> S.V., Kalafatov D.A.<sup>3</sup>, Bogutsky<sup>4</sup> Y.G.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture"  
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493  
E-mail: <sup>1</sup>mennanov.elmar@mail.ru; <sup>2</sup>sv\_rodin@mail.ru; <sup>3</sup>jafer90@mail.ru; <sup>4</sup>bogutskiyg@mail.ru

**Abstract.** The article presents the results of studies of foundation models when breaking along inclined sections and in the form of punching. For rational planning of experiments, a large combination square was constructed, consisting of 25 medium-sized squares corresponding to all combinations of two factors (cubic strength of concrete and reinforcement coefficient). Each of the 25 middle squares, in turn, consists of 25 cells, corresponding to all possible combinations of other factors: the height of the foundation slab and the relative overhang of the cantilever part. Experimental studies were carried out with large-scale reinforced concrete models of foundations on a sand base, which made it possible to study the parameters of the joint operation of the foundation and soil, and to establish geometric and strength factors that play an important role in the formation of the process of brittle destruction of the foundation (overhang of cantilevers, height of the foundation slab, reinforcement, strength of concrete).

**Materials and methods:** Our experimental studies were divided into two phases:

1 – conducting staged experiments on large-scale reinforced concrete models of foundations in order to select four factors, since a greater number of factors introduced into empirical formulas practically does not increase the accuracy of the formulas, but only increases the number and labor intensity of experiments;

2 – study of the influence of the shape of the plot, normal contact stresses and established primary factors on the strength when punching foundations of full-scale dimensions (2x2 m).

Staged experimental studies were carried out on a series of three or five identical models of foundations with a plan size of 1x1x0.1 m (height) at different values of the factors under study. The foundation structures are shown in Figure 1.

**Results:** experimental study of the effect of diagrams of contact stresses of sandy soil on the strength of full-scale columnar foundations during punching; identification of real forms of the punching pyramid on full-scale reinforced concrete foundation samples; development of a method for calculating the strength of brittle fracture of columnar foundations on a sand base; obtaining mathematical dependencies of the destructive load on the parameters of the foundation structure; New structural solutions for foundations.

**Conclusions:** на основе статистической обработки результатов экспериментальных исследований, выполненных по комбинационному квадрату, получена эмпирическая формула расчета прочности, расчеты по которой для фундаментов, разрушившихся от продавливания, наиболее точно согласуются с экспериментальными данными. Полученная формула может быть рекомендована как экспресс-метод оценки прочности фундамента.

**Key words:** foundation, soil, exploration, planning, reinforced, concrete.