

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

2024, Том 11, № 2 / 2024, Vol. 11, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS224.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS224 (<https://doi.org/10.15862/12SATS224>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

УДК 624.151.5

## Исследование взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с песчаным основанием при быстрых догружениях

Дьяков И.М., Дьяков М.И.

ФГАОУ «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дьяков Игорь Михайлович, e-mail: Karta3@mail.ru

**Аннотация.** Влияние быстрых догружений на силовое взаимодействие фундаментов с грунтовым основанием не исследовано в достаточной степени для разработки методики расчета фундаментов. Изучение особенностей взаимодействия фундаментов с основанием необходимо для разработки методики расчета каркасных зданий на прогрессирующее обрушение, расчета новых фундаментов при пересадке на них зданий в процессе реконструкции, оценке безопасности фундаментов зданий, которые подвержены быстрым догружениям.

Для выявления особенностей силового взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием авторами проведены экспериментальные исследования в грунтовом лотке с железобетонными и металлическими моделями фундаментов при различных режимах медленного нагружения и быстрого догружения.

В исследованиях экспериментально выявлены такие особенности влияния быстрого догружения на силовое взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с основанием, как снижение несущей способности фундаментов на изгиб, изменение величины осадки и

формы эпюры нормальных контактных напряжений. Определена основная причина снижения несущей способности фундаментов на изгиб при быстрых догружениях — относительное увеличение нормальных контактных напряжений под краевыми зонами фундаментов, приводящее к возрастанию изгибающего момента в расчетных сечениях конструкции. По результатам исследований авторами предложена методика расчетного определения эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента с учетом уровня медленного нагружения и быстрого догружения, основанная на усовершенствованной модели Фусса-Винклера с переменными коэффициентами жесткости основания. В статье проведено сопоставление расчетных данных по предложенной методике и опытных значений, показавшее хорошую сходимость результатов.

**Ключевые слова:** быстрое догружение; отдельно стоящие фундаменты; нормальные контактные напряжения; коэффициент жесткости основания; перераспределение напряжений; эпюра напряжений; изгиб; силовое взаимодействие

## Interaction investigation of the free-standing foundations with sandy basement under rapid additional loading

Igor M. Diakov, Mikhail I. Diakov

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia

Corresponding author: Igor M. Diakov, e-mail: Karta3@mail.ru

**Abstract.** The influence of fast additional loading on the force interaction of foundations with the subgrade soil has not been investigated sufficiently for the development of foundation calculation methods. The study of the interaction peculiarities between foundations and the subgrade soil is necessary for the foundation calculation methods development to improve the calculation of frame buildings for progressive collapse, the calculation of new foundations when buildings are transplanted on them in the reconstruction process, and to assess the safety of buildings foundations subjected to fast loading.

In order to reveal the peculiarities of force interaction between foundations and the subgrade soil, the authors conducted experimental studies in a soil flume with reinforced concrete and metal models of foundations under different modes of slow loading and fast additional loading.

The studies experimentally revealed such peculiarities of the fast loading effect on the force interaction of freestanding foundations with the subgrade soil as a decrease in the bending bearing capacity of the

foundations, changes in the value of settlement and the shape of the normal subgrade stresses. The main reason for the decrease in the bending load-bearing capacity of foundations under fast additional loading is the relative increase in normal subgrade stresses under the boundary zones of foundations, which leads to an increase in the bending moment in the design cross-sections of the structure. Based on the research results, the authors have proposed a methodology for the calculated epure determination of the normal subgrade stresses under the foundation base, taking into account the level of slow loading and fast loading, based on the improved Fuss-Winkler model with variable modulus of foundation bed rigidity. The paper compares the calculated data according to the proposed methodology and the experimental values, showing a good precision of results.

**Keywords:** fast loading; free-standing foundations; normal contact stresses; modulus of foundation bed rigidity; stress redistribution; stress epure; bending; force interaction

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

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



## Введение

### Introduction

Под быстрым догрузением в проведенных исследованиях понимается дополнительное нагружение фундаментов нагрузкой, скорость возрастания которого превышает скорость процесса перераспределения напряжений в основании от данного догружения, но не вызывает существенного динамического эффекта [1]. Быстрые догружения фундаментов характерны при реконструкции зданий с пересадкой либо передачей части нагрузки на новые фундаменты [2], во время складирования тяжелых грузов на перекрытие, для ряда транспортных сооружений, при воздействии на здания и сооружения природных факторов и экзогенных процессов (например обрушение откоса грунта), при повреждении колонны каркасного здания и в ряде других случаев. Изменение взаимодействия фундаментов с грунтом при быстрых догружениях остается практически не изученным. Быстрые догружения не учитываются в методиках определения эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента и расчетных моделях силового сопротивления фундаментов, в расчете зданий на прогрессирующее обрушение [3; 4].

Исследования таких ученых, как: А.А. Бартоломей, Ю.В. Галашев, А.В. Голли, С.В. Довнарвич, В.П. Дыба, О.В. Евдокимцев, В.В. Ильичёв, С.И. Евтушенко, Е.Н. Курбацкий, Май Дык Минь, Ю.Н. Мурзенко, А.И. Полищук, Г.М. Скибин, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, В.А. Флорин [5–9] и других авторов показали, что характер и особенности приложения внешней нагрузки на фундамент оказывают существенное влияние на характеристики и напряженно-деформированное состояние грунтового основания. В исследованиях А.С. Везиса, А.Н. Драновского, М.С. Савкина, А.И. Латыпова, В.С. Федорова, В.А. Корнатовая, Е.К. Юдина, В.В. Леденева, В.Г. Однолько, З.Х. Нгуена, С.Ф. Маклакова, В.А. Мишина, Н.Н. Маслова, А. Казагранде, В. Шанона, Р. Уайтмана, Н.Я. Хархуты, Г.В. Рыкова, А.М. Скобеева, Л.Ф. Сиразиева, М.Г. Скибина, К.С. Какенеова, Л.Ф. Сиразиева, В.В. Денисенко, П.А. Ляшенко рассмотрены вопросы влияния скорости нагружения и перемещения на характеристики грунта и основание [10–15]. В исследованиях Н.Я. Хархуты, Ю.М. Васильева [16] определено, что наибольшее влияние на связные грунты оказывает нагружение со скоростью 0,01–3,0 МПа. Вместе с тем, эксперименты в многих исследованиях проводились преимущественно штампами либо на лабораторном оборудовании. При этом влияние быстрого догружения на силовое взаимодействие фундаментов с основанием и их несущую способность на изгиб при быстром догружении практически не изучалось.

Цель исследования: на основе экспериментальных и теоретических исследований выявить особенности влияния быстрого догружения на силовое взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с основанием, разработать методику расчета фундаментов на изгиб, учитывающую уточненную форму эпюры нормальных контактных напряжений.

## Методы

Для изучения особенностей силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстрых догружениях были проведены экспериментальные исследования. Параметры экспериментальных исследований были определены в соответствии аналитическим обзором литературы и планированием экспериментов [17], кроме того, были выполнены серии дополнительных экспериментов.

Исследования проводили в грунтовом лотке размерами 2 200×2 200×2 200 мм, заполненном песком средней крупности и имеющем силовую раму. Нагружение осуществляли гидropневмодократом. При этом скорость нагружения регулировалась давлением воздуха в пневмосистеме. Было испытано 11 моделей железобетонных квадратных в плане фундаментов размерами 500×500 мм с толщиной плиты 70–82 мм; 5 моделей прямоугольных в плане железобетонных фундаментов размерами 500×400 мм с толщиной плиты 70 и 80 мм. Также проведено 12 экспериментов с металлической моделью, имеющей размеры в плане 425×425 мм.

На железобетонных моделях изучали влияния быстрого нагружения на несущую способность, осадку, эпюру нормальных контактных напряжений фундаментов. Часть моделей испытывали при ступенчатом медленном нагружении до разрушения. Для остальных моделей выполнялось быстрое догружение после начального медленного нагружения уровнями нагрузки 25, 50 и 75 % от расчетной разрушающей. Металлические модели применялись для изучения трансформации эпюры нормальных контактных напряжений во время медленного нагружения, быстрого догружения и после стабилизации внешней нагрузки. Максимальную нагрузку быстрого догружения задавали с учетом несущей способности основания. Скорость нагружения в экспериментах составляла 0,1–1,0 МПа/мин. В процессе экспериментов производили измерение уровня внешней нагрузки, величины осадки и деформации плиты фундамента, нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента. Фиксацию показаний приборов осуществляли с помощью видеорегистратора.

## Результаты

### Results

Разрушение железобетонных моделей фундаментов произошло от изгиба по нормальным сечениям независимо от характера нагрузки. В экспериментах отмечено снижение несущей способности моделей, испытанных с быстрым догружением, на 14,7–24,8 % относительно фундаментов с медленным нагружением (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

#### Характеристики моделей фундаментов и результатов их испытания

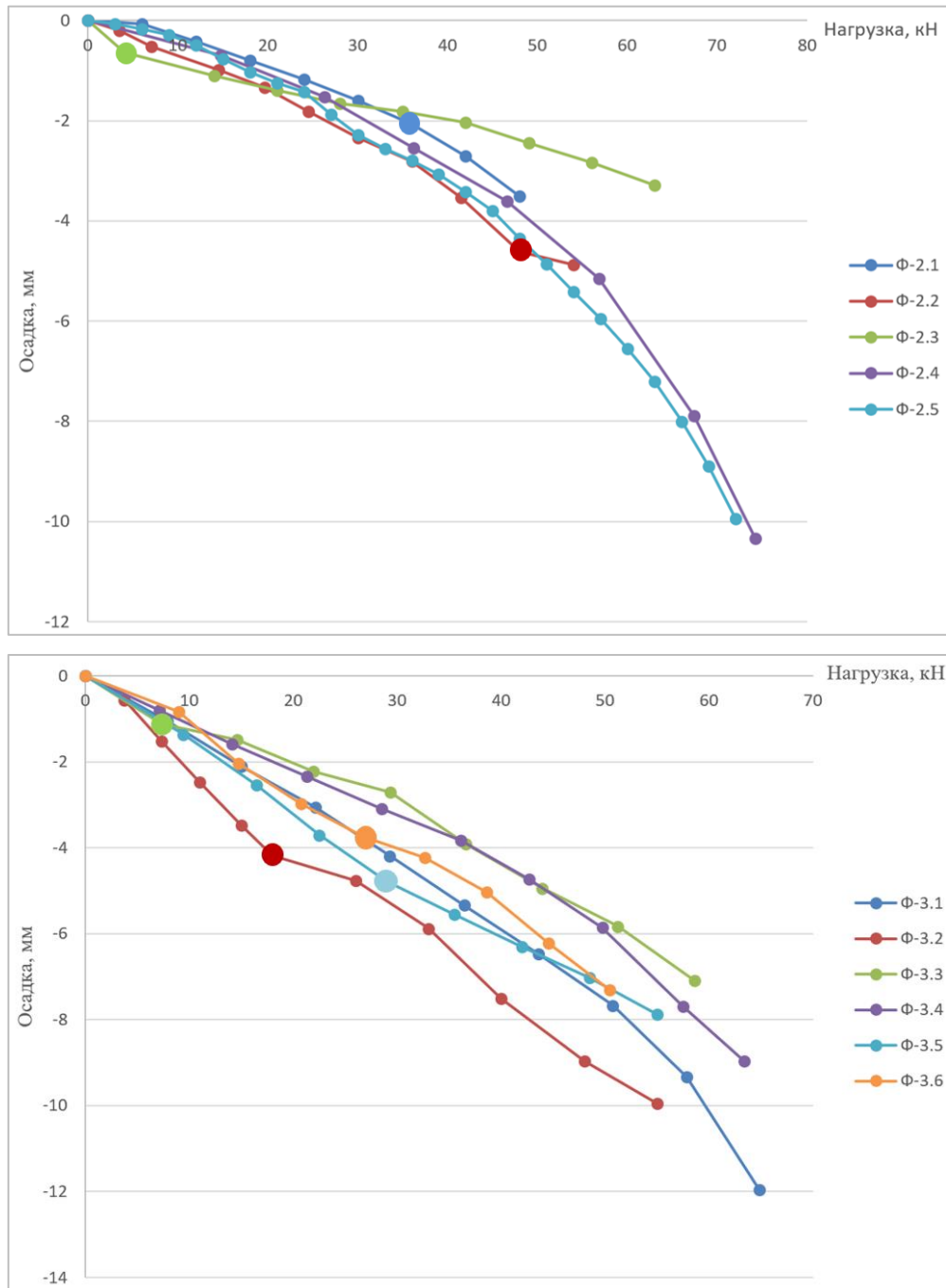
#### Characteristics of the foundation models and their test results

№ модели <i>Model No.</i>	Размеры в плане, высота плитной части, см <i>Dimensions in plan, height of slab part, cm</i>	Расчетная нормативная несущая способность фундаментов на изгиб $R_{из}$ , кН <i>Calculated normative bearing capacity of foundations <math>R_{uz}</math>, kN</i>	Уровень предварительного медленного нагружения (кН) <i>Preliminary slow loading level (kN)</i>	Наличие быстрого догружения <i>Fast additional loading availability</i>	Опытная несущая способность, $P_i$ (кН) <i>Experimental bearing capacity, <math>P_i</math> (kN)</i>	$P_i/P_{из}$	Снижение несущей способности относительно условного базового фундамента (%) <i>Bearing capacity reduction relative to the conventional base foundation (%)</i>
<i>1-я серия экспериментов / 1st series of experiments</i>							
Ф-1	50×50×7	35,4	—	нет/ <i>no</i>	40	1,13	—
Ф-2	50×50×7	35,4	15	да/ <i>yes</i>	35	0,99	12,5
Ф-3	50×50×7	35,4	21	да/ <i>yes</i>	36	1,02	10
Ф-4	50×50×7	35,4	15*	нет/ <i>no</i>	48	1,36	—
Ф-5	50×50×7	35,4	15*	да/ <i>yes</i>	39	1,1	18,8
<i>2-я серия экспериментов / 2nd series of experiments</i>							
Ф-2.1	40×60,7	47,6	36	да/ <i>yes</i>	48	1,01	21,7
Ф-2.2	40×60,8	55,8	48	да/ <i>yes</i>	54,1	0,97	24,8
Ф-2.3	40×60,8	57,4	4	да/ <i>yes</i>	63,6	1,1	14,7
Ф-2.4	40×60,8	55,8	—	нет/ <i>no</i>	75	1,34	—
Ф-2.5	40×60,8	55,8	—	нет/ <i>no</i>	72	1,29	—
<i>3-я серия экспериментов / 3rd series of experiments</i>							
Ф-3.1	50×50×7	23,85	—	нет/ <i>no</i>	61	2,56	—
Ф-3.2	50×50×8	27,96	18,3	да/ <i>yes</i>	55	1,96	20,5
Ф-3.3	50×50×8,2	28,77	7,32	да/ <i>yes</i>	59	2,05	16,8
Ф-3.4	50×50×8	27,88	—	нет/ <i>no</i>	66	2,37	—
Ф-3.5	50×50×8	27,88	28,9	да/ <i>yes</i>	56	2,01	18,4
Ф-3.6	50×50×7,6	26,35	26,7	да/ <i>yes</i>	51	1,93	21,7

\* 10 циклов предварительного медленного нагружения. Составлено авторами /  
\* 10 cycles of preliminary slow loading. Compiled by the authors

Осадка железобетонных фундаментов, испытанных с быстрым догружением, на момент разрушения была меньше, чем осадка аналогичных образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении (рис. 1). При этом наблюдалось сползание графика осадки

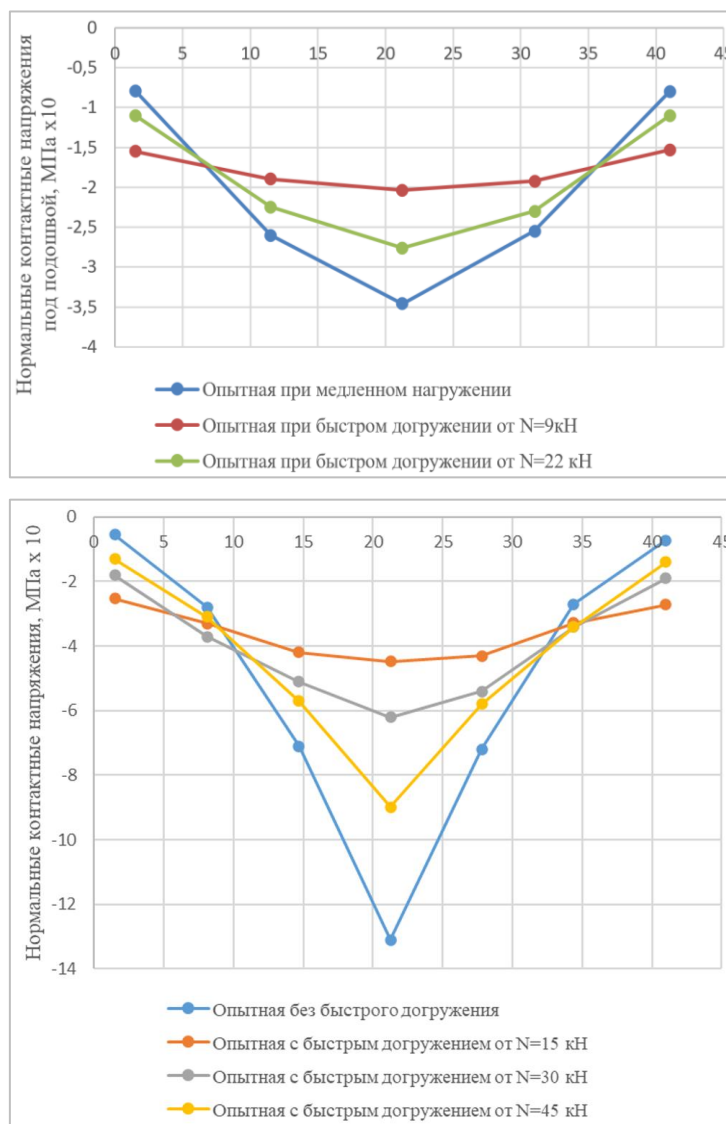
после начала быстрого догружения. Сниженная величина осадки при быстром догружении объясняется как отставанием развития пластических и сдвиговых деформаций в грунте от роста внешней нагрузки, так и отсутствием силового равновесия между внешней нагрузкой и опорной реакцией грунта. Последнее подтверждается увеличением ординат эпюры нормальных контактных напряжений в грунте под металлическими штампами после остановки нагрузки быстрого догружения.



**Рисунок 1.** Сравнение осадки железобетонных моделей фундаментов 2 и 3 серий. Начало быстрого догружения указано крупными точками (рисунок авторов)

**Figure 1.** Settlement comparison of reinforced concrete foundation models of series 2 and 3. The onset of fast additional loading is indicated by large dots (authors' drawing)

Для всех моделей фундаментов перед быстрым догрузением отмечалась параболическая форма эпюры нормальных контактных напряжений. Исследования с металлическими штампами показали, что после быстрого догрузения у краевых зон подошвы нормальные контактные напряжения имели более высокие значения относительно образцов, испытанных при медленном нагружении (рис. 2). При этом под центральной зоной подошвы наблюдалась противоположная тенденция. После остановки быстрого догрузения под краевой зоной подошвы наблюдался непродолжительный во времени рост нормальных контактных напряжений, после чего они стабилизировались либо незначительно снижались. Под средней частью подошвы фундаменты напряжения возрастали в течении более длительного промежутка времени.



**Рисунок 2.** Сравнение эпюр нормальных контактных напряжений при медленном нагружении и быстром догрузении до 31 и 60 кН (рисунок авторов)

**Figure 2.** Comparison of normal subgrade stress epures for slow loading and fast additional loading up to 31 and 60 kN (authors' drawing)

Таким образом, основной причиной относительного увеличения нормальных контактных напряжений под краевой зоной подошвы фундамента при быстром догрузении является отставание во времени развития пластических и сдвиговых деформаций относительно увеличения внешней нагрузки. При этом с высокой степенью вероятности можно предположить влияние на данный процесс дилатансии. Косвенно возможность такого влияния подтверждается в работах ряда авторов [18; 19].

В исследованиях установлено, что основной причиной снижения несущей способности фундамента на изгиб при быстром догрузении является увеличение изгибающего момента в плитной части конструкции, связанное с более высоким уровнем нормальных контактных напряжений под периферийной зоной подошвы фундамента.

На основании проведенных исследований была разработана модель расчетного определения нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента при медленном нагружении и быстром догрузении. Она представляет собой усовершенствованную модель Фусса-Винклера с переменным по площади подошвы коэффициентом жесткости основания, изменяющимся в зависимости от уровня медленного нагружения и уровня нагруженности основания при медленном нагружении и быстром догрузении.

При разработке модели были приняты следующие допущения и упрощения:

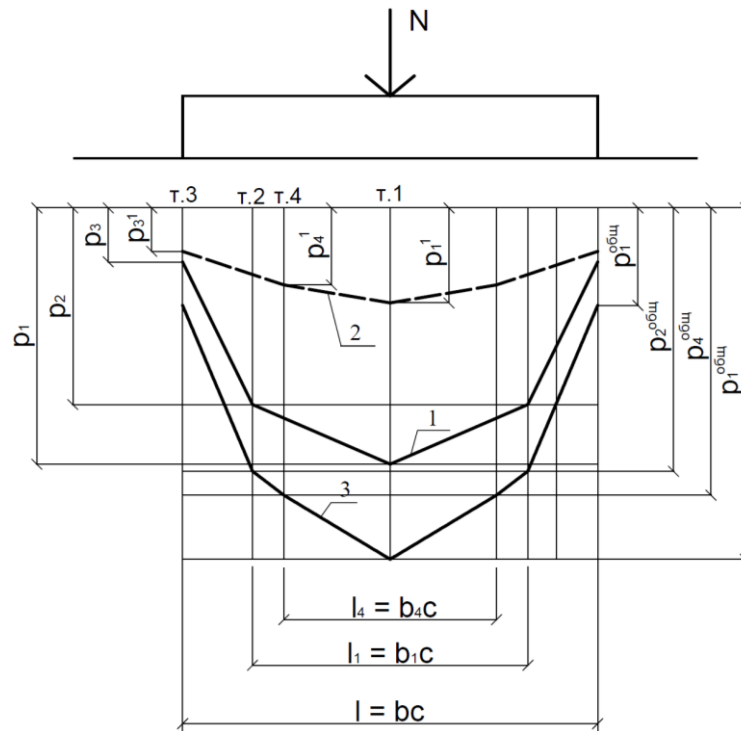
1. Границами применимости разработанной методики является скорость быстрого догрузения 0,05–3 МПа.

2. Основой для построения эпюры на стадии быстрого догрузения является эпюра, перераспределенная на стадии медленного нагружения. При этом стартовая эпюра медленного нагружения учитывает развитие пластических и сдвиговых деформаций под краевыми зонами подошвы, формированием уплотненного ядра грунта под центральной частью подошвы. При уточненном расчете возможен учет изгиба плиты фундамента и образование в ней нормальных трещин.

3. При быстром догрузении происходит более интенсивный рост краевых контактных напряжений относительно медленного нагружения, что связано с замедлением процесса развития пластических деформаций, кратковременным увеличением прочности грунта на сдвиг, возможным влиянием процесса дилатансии и фрикционных автоколебаний.

4. Под центральной частью подошвы фундамента при быстром догрузении происходит торможение роста нормальных контактных напряжений, что связано с относительным возрастанием напряжений под краевыми зонами подошвы, снижением осадки фундамента.

Итоговая расчетная эпюра нормальных контактных напряжений представляет собой сумму эпюры, сформировавшейся при медленном нагружении, и дополнительной эпюры быстрого догружения (рис. 3).



1 — эпюра при медленном нагружении; 2 — дополнительная эпюра от нагрузки быстрого догружения;  
 3 — итоговая эпюра

1 — epure at slow loading; 2 — additional epure from fast additional loading; 3 — final epure

**Рисунок 3.** Схема к определению эпюры нормальных контактных напряжений при быстром догружении (рисунок авторов)

**Figure 3.** Diagram for determination of normal subgrade stresses epures at fast additional loading (authors' figure)

На стадии медленного нагружения:

В точке 1 нормальные контактные напряжения определяются с использованием коэффициента жесткости основания  $K_1$ , возрастающего с увеличением степени нагруженности основания, и осадки при нагрузке медленного нагружения  $S$ . Коэффициент  $K_1$  может учитывать наличие малоцикловых нагружений и других факторов, ускоряющих формирование упругого уплотненного грунта под средней частью подошвы фундамента.

$$p_1 = K_1 \times S, \quad (1)$$

$$K_1 = K \times k_5 \left( \frac{p_{cp}}{R_0} \right), \quad (2)$$

где  $k_5$  — коэффициент, зависящий от особенностей песчаного основания. Для рассматриваемых условий принято значение  $k_5 = 10$ ;  $p_{cp}$  — среднее давление под подошвой фундамента при нагрузке медленного нагружения  $N$ .

В точке 2 нормальные контактные напряжения рассчитываются с учетом постоянного коэффициента жесткости основания  $K$ , определенного для рассматриваемого грунта. Напряжения здесь равны средним напряжениям.

$$p_2 = p_{cp} = K \times S. \tag{3}$$

В точке 3 нормальные контактные напряжения вычисляются с учетом уменьшающегося в зависимости от степени нагруженности основания коэффициента жесткости основания  $K_3$ . Коэффициент может учитывать факторы, снижающие процесс развития пластических деформаций под краевой зоной подошвы фундамента, например заглубление фундамента, армирование основания и т. д.

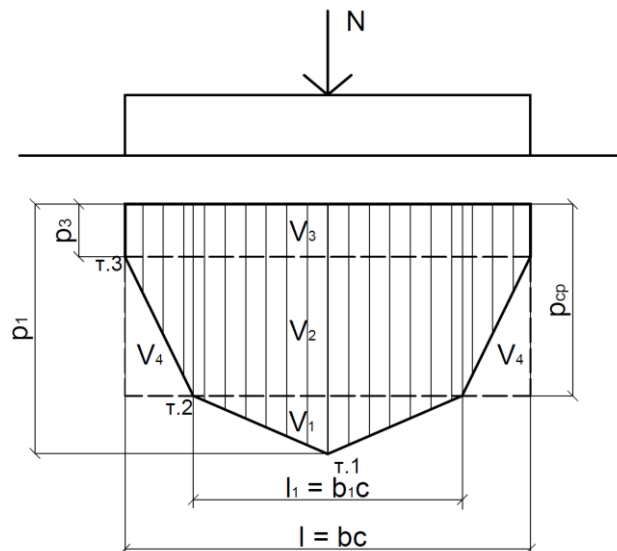
$$p_3 = K_3 \times S, \tag{4}$$

$$K_3 = K \times k_6^{\left(\frac{p_{cp}}{R_0}\right)}, \tag{5}$$

где  $k_6$  — коэффициент, зависящий от особенностей песчаного основания, уровня заглубления фундамента, размера подошвы. В рассматриваемых условиях принято значение  $k_6 = 0,1$ .

Расстояние  $l_1$  и  $b_1$  определяется из условия равенства суммы объемов  $V_1$  и  $V_4$  (рис. 4).

$$b_1 = \frac{((K_3 - K) \times b) + \sqrt{b^2 \times (K - K_3) \times (K - 9 \times K_3 + 8 \times K_1)}}{2 \times (K_1 - K_3)}. \tag{6}$$



**Рисунок 4.** Схема для определения объема расчетной эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента при медленном нагружении (рисунок авторов)

**Figure 4.** Diagram for determining the volume of the calculated normal subgrade stresses epure under the foundation base under slow loading (authors' drawing)

Осадка всех точек подошвы фундамента при отсутствии учета прогиба плиты и образования в ней трещин принята одинаковой. Условную осадку  $S$  определяем из равенства объема эпюры нормальных контактных напряжений внешней нагрузке:

$$V_1 + V_2 + V_3 = N, \quad (7)$$

$$S = \frac{3 \times N}{(3 \times b^2 \times K_3 + (K - K_3) \times (b_1^2 + b^2 + b \times b_1) + (K_1 - K) \times b_1^2) \times c}. \quad (8)$$

На стадии быстрого догружения:

В точке 1 дополнительные напряжения определяются с учетом повышенного коэффициента жесткости основания  $K_1^l$ , учитывающего влияние быстрого догружения.

$$p_1^l = K_1^l \times S_1, \quad (9)$$

где  $S_1$  — осадка фундамента от нагрузки быстрого догружения.

Коэффициент  $K_1^l$  определяется в зависимости от уровня медленного нагружения, предшествовавшего быстрому догружению, учтенного в  $K_1$ . Изменение характера работы грунта при быстром догружении определяется введением коэффициента  $a_1$ .

$$K_1^l = K_1 \times a_1, \quad (10)$$

где  $a_1$  — коэффициент изменения жесткости основания в зоне уплотнения. При быстром догружении. В условиях проведенного исследования принято значение  $a_1 = 1$ .

В точке 4 дополнительные нормальные контактные напряжения при быстром догружении определяются с учетом коэффициента жесткости основания  $K$ , установленного для рассматриваемого грунта.

$$p_4^l = K \times S^l. \quad (11)$$

В точке 3 дополнительные нормальные контактные напряжения определяются с учетом коэффициента жесткости основания  $K_3^l$ .

$$p_3^l = K_3^l \times S^l. \quad (12)$$

Величина коэффициента  $K_3^l$  рассчитывается с использованием коэффициента  $K_3$ , достигнутого при медленном нагружении, и коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$ , определяющих замедление снижения коэффициента жесткости основания при быстром догружении.

$$K_3^l = K_3 + (K - K_3) \times a_2 \times a_3. \quad (13)$$

Коэффициент  $a_2$  учитывает изменение коэффициента жесткости основания, связанные с замедлением развития пластических деформаций в основании при быстром догружении.

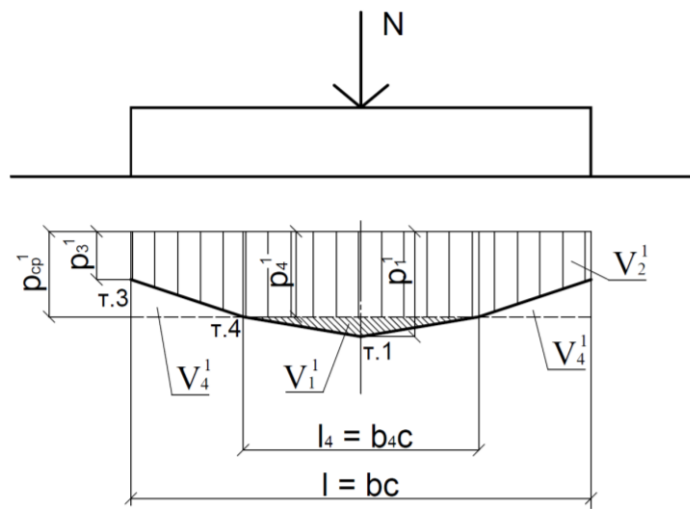
$$a_2 = 0,3 \left( \frac{p_{cp}^I}{R_0} \right), \quad (14)$$

где  $p_{cp}^I$  — среднее давление под подошвой фундамента на момент максимальной нагрузки после быстрого догружения  $N + N_I$ .

$$p_{cp}^I = \frac{N+N_I}{b \times l}. \quad (15)$$

Коэффициент  $a_3$  зависит от скорости догружения. Для скорости догружения в исследуемом диапазоне 0,1–1,0 МПа/мин коэффициент  $a_3$  принят равным 1,0.

Расстояние  $b_4$  определяется из условия равенства суммы эпюры  $V_I^I = V_4^I$  (рис. 5).



**Рисунок 5.** Схема к определению параметров дополнительной эпюры нормальных контактных напряжений при быстром догружении (рисунок авторов)

**Figure 5.** Diagram for determining the parameters of the additional normal subgrade stress epure under fast additional loading (authors' drawing)

$$b_4 = \frac{(K_3^I - K) \times b + \sqrt{(b^2 (K - K_3^I) \times (K - 9 \times K_3^I + 8 \times K_1^I))}}{2 \times (K_1^I - K_3^I)}. \quad (16)$$

Условная дополнительная осадка от нагрузки быстрого догружения определяется из равенства объема эпюры внешней нагрузке быстрого догружения:

$$S^I = \frac{3 \times N_I}{c \times (3 \times b^2 \times K_3^I + (K - K_3^I) \times (b_4^2 + b^2 + b \times b_4) + (K_1^I - K) \times b_4^2)}. \quad (17)$$

Суммарные ординаты эпюры нормальных контактных напряжений при итоговом нагружении фундамента определяются по формулам 18–21.

$$p_1^{общ} = p_I + p_1^I, \quad (18)$$

$$p_2^{общ} = p_2 + p_2^I, \quad (19)$$

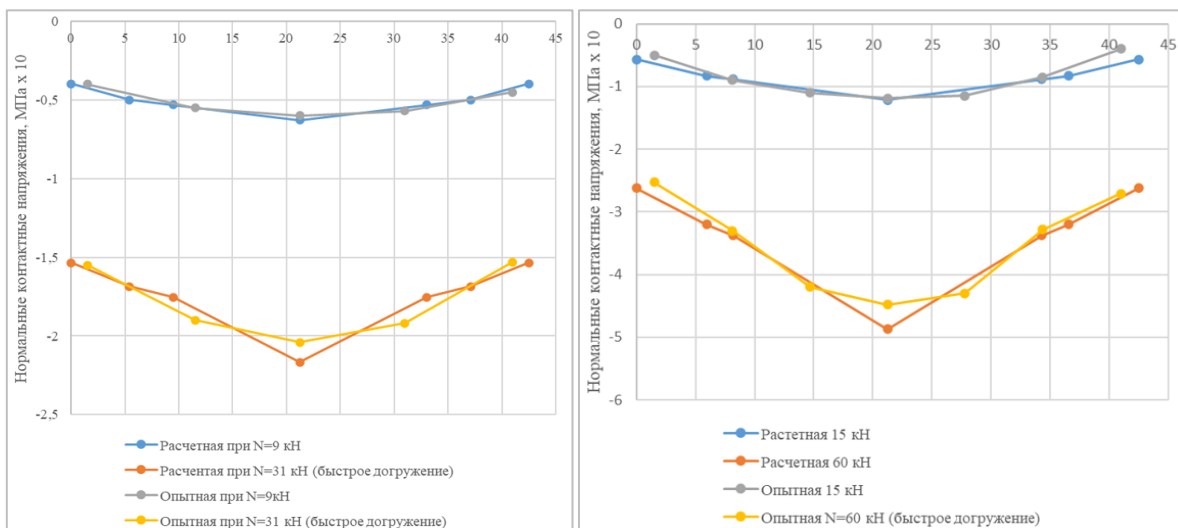
$$p_4^{общ} = p_2 + (p_1 - p_2) \times \frac{b_1 - b_4}{b_1} + p_4^I, \quad (20)$$

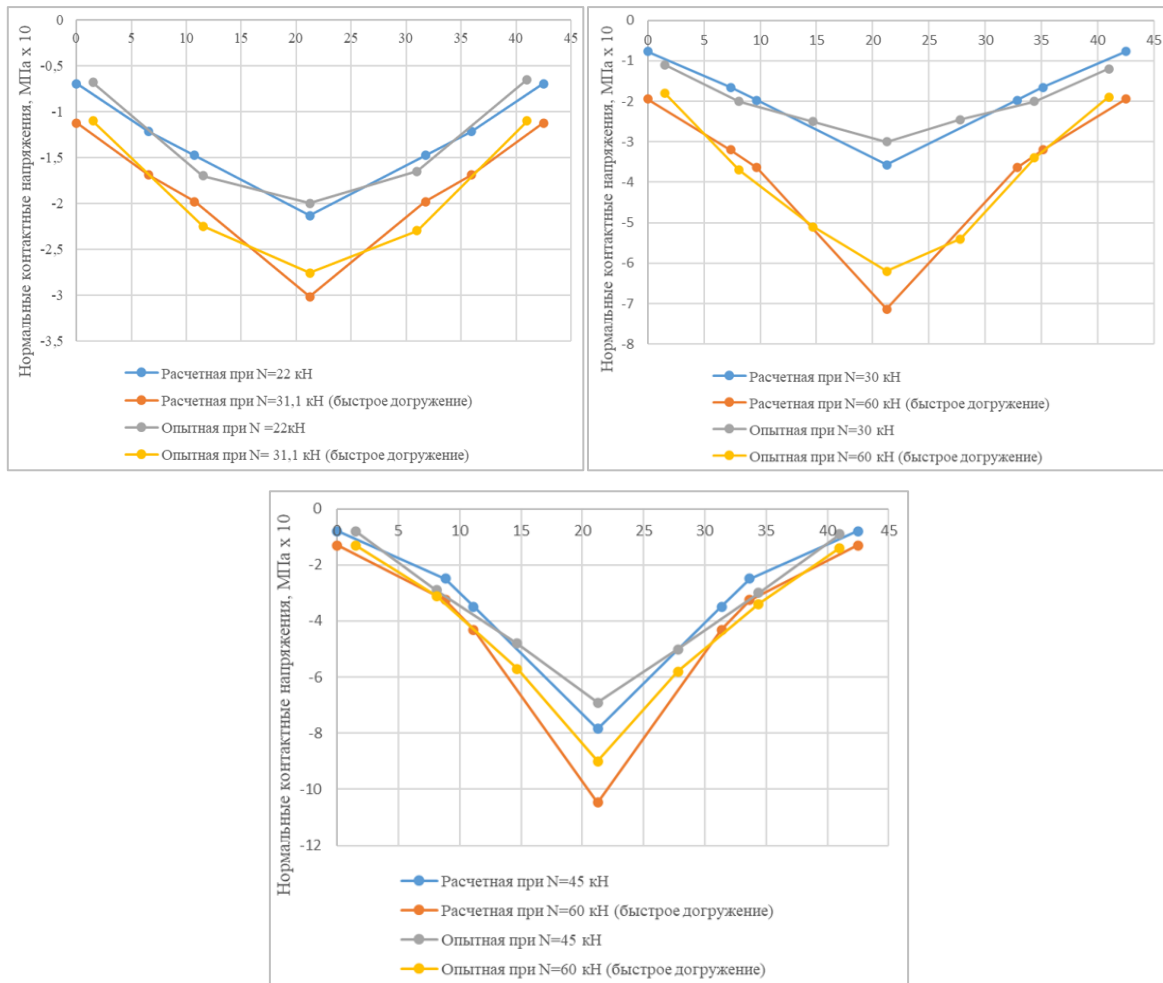
$$p_3^{общ} = p_3 + p_3^I. \quad (21)$$

На основании методики определения ординат эпюры нормальных контактных напряжений разработана методика и алгоритм расчета несущей способности фундаментов при быстрых догружениях. При этом приняты следующие допущения и упрощения:

- Объем эпюры нормальных контактных напряжений на момент разрушения фундамента равен внешней нагрузке.
- Процесс разрушения фундамента от изгиба происходит со скоростью существенно выше, чем скорость перераспределения нормальных контактных напряжений в основании. Вследствие этого продолжительность данного процесса условно принимается равной нулю, а перераспределение нормальных контактных напряжений в процессе разрушения не происходит.

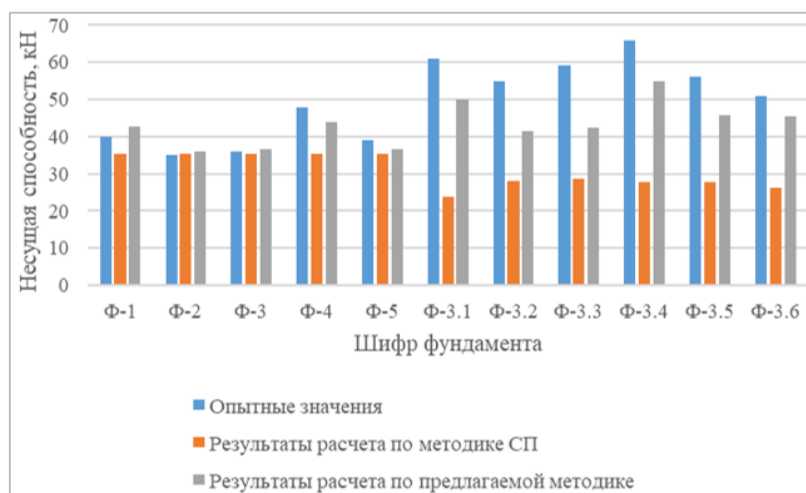
Изгибающий момент в расчетном сечении по грани колонны определяется как сумма моментов от медленного нагружения и быстрого догружения. Несущая способность фундамента определяется методом итераций. На основе разработанной методики составлена расчетная программа в среде программирования VBA Microsoft Excel. Результаты расчета нормальных контактных напряжений и сопоставление их с опытными для некоторых железобетонных фундаментов и металлических моделей представлены на рисунке 6. Как видно из эпюр сходимость расчетных и опытных значений удовлетворительная.





**Рисунок 6.** Сравнение опытных и расчетных эпюр нормальных контактных напряжения под металлической моделью (рисунок авторов)

**Figure 6.** Comparison of experimental and calculated normal subgrade stresses under the metal model (authors' figure)



**Рисунок 7.** Сравнение опытных и расчетных значений несущей способности фундаментов по нормативной и предлагаемой методике (рисунок авторов)

**Figure 7.** Comparison of experimental and calculated bearing capacity values of foundations according to the normative and proposed method (authors' figure)

Сравнение опытной несущей способности фундаментов с расчетными значениями по нормам и предлагаемой методике представлено на рисунке 7. Расчетные значения по предложенной методике расчета прочности имеют лучшую сходимость результатов с опытными значениями.

## Обсуждение

### Discussion

Воздействие быстрых (внезапных) догрузений оказывает существенное влияние на силовое взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с грунтовым снованием, приводя к изменениям эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента, осадки и несущей способности фундамента.

Изменения силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым снованием зависит от уровня предварительного медленного нагружения и величины нагрузки быстрого догружения. При этом более низкая величина усилия медленного нагружения и более высокое значение нагрузки быстрого догружения способствует максимальным изменениям в эпюре контактных напряжений и в графике осадки.

С момента начала быстрого догружения наблюдается замедление осадки фундамента со сползанием графика. При этом форма графика может приобретать обратный выгиб. Осадка на момент разрушения фундамента при быстром догружении ниже, чем при медленном нагружении при одной и той же величине внешней нагрузки.

Воздействие быстрого догружения способствует относительному увеличению ординат эпюры нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента и уменьшению ординат эпюры под центральной зоной подошвы, что в наибольшей степени связано с отставанием во времени развития пластических и сдвиговых деформаций от возрастания нагрузки.

Изменение эпюры нормальных контактных напряжений при быстром догружении приводит к снижению несущей способности фундамента на изгиб вследствие увеличения уровня изгибающего момента в расчетных сечениях.

После стабилизации нагрузки быстрого догружения на протяжении ограниченного времени происходит небольшой рост нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы с возможным последующим снижением и более продолжительный интенсивный прост нормальных контактных напряжений под центральной частью эпюры.

Рост напряжений под центральной частью подошвы по характеру и продолжительности совпадает с ростом осадки фундамента.

В исследуемом диапазоне скорости нагружения (0,1–1,0 МПа/мин) существенное влияние скорости догружения на изменение формы эпюры нормальных контактных напряжений, осадку и характер разрушения фундаментов не выявлено, что объясняется значительной разницей скорости догружения и скорости перераспределения нормальных контактных напряжений и развития осадки фундамента.

Разработанная методика расчетного определения ординат эпюр нормальных контактных напряжений, основанная на усовершенствованной модели Фусса-Винклера с переменным по площади подошвы коэффициентом жесткости основания, изменяющимся в зависимости от уровня медленного нагружения и уровня нагруженности основания при медленном нагружении и быстром догружении, показала хорошую сходимость опытных и расчетных данных.

Построенная на основе разработанной методики расчетного определения ординат эпюр нормальных контактных напряжений методика определения прочности фундаментов на изгиб с учетом медленного нагружения и быстрого догружения показала лучшую сходимость результатов расчета с опытными значениями, чем нормативная методика.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Колчунов, В.И.** Способ усиления каркаса многоэтажного здания при неравномерных осадках фундаментов / В.И. Колчунов, И.М. Дьяков, С.В. Гречишников, М.И. Дьяков. — DOI <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-85-5-63-73> // Строительство и реконструкция. — 2019. — № 5. — С. 63–73. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41616366>. — EDN OKFBCZ. (дата обращения: 12.03.2024).
2. **Diakov, I.N.** Experimental studies of the "foundation-soil" system operation with sudden loading / I.N. Diakov, N.V. Tsarenko, M.I. Diakov. — DOI <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/913/2/022064> // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Т 913. — С. 22064. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/913/2/022064>. (дата обращения: 12.03.2024).
3. **Колчунов, В.И.** Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения / В.И. Колчунов, В.С. Московцева, О.Б. Бушова, Д.И. Жуков. — DOI <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44> // Строительство и реконструкция. — 2021. — № 4. — С. 35–44. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46591990>. — EDN MUQBPN. (дата обращения: 12.03.2024).
4. **Травуш, В.И.** Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований / В.И. Травуш, В.И. Колчунов, Е.В. Леонтьев. — DOI <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.02.46-54> // Промышленное и гражданское строительство. — 2019. — № 2. — С. 46–54. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yxlqnv>. — EDN YXLQNV. (дата обращения: 12.03.2024).
5. **Тер-Мартиросян, А.З.** Осадки оснований сооружений при статическом, циклическом и вибрационном воздействиях / А.З. Тер-Мартиросян // Геотехника. — 2010. — № 4. — С. 77–81. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17649250>. — EDN OWFRPB. (дата обращения: 12.03.2024).

6. **Алексеев, В.М.** Экспериментальные исследования работы фундаментов при действии центральной и внецентренной многократно повторной нагрузки / В.М. Алексеев, О.В. Евдокимцев, В.В. Леденев. — Москва: ВНИИТПИ, 1998. — № 11691. — 25 с.
7. **Леденев, В.В.** Основания и фундаменты при сложных силовых воздействиях (опыты). Том 2: Монография для научных работников, аспирантов и магистрантов строительного профиля / В.В. Леденев. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 289 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29995176>. — EDN ZGJZQD. (дата обращения: 12.03.2024).
8. **Jia, J.** Dynamic and Cyclic Properties of Soils / J. Jia. — DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-319-40358-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40358-8_2) // Soil Dynamics and Foundation Modeling / Кам: Springer, 2018. — С. 75–108. — URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40358-8\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40358-8_2). (дата обращения: 12.03.2024).
9. **Леденев, В.В.** Несущая способность и деформативность оснований и фундаментов при сложных силовых воздействиях: Монография / В.В. Леденев. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 324 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zgjznl>. — EDN ZGJZNL. (дата обращения: 12.03.2024).
10. **Сиразиев, Л.Ф.** Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного грунтового основания при кратковременных штамповых испытаниях и наличии водонасыщенного слоя / Л.Ф. Сиразиев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2017. — № 4. — С. 228–236. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30604718>. — EDN ZTSUNJ. (дата обращения: 02.04.2024).
11. **Vesić, A.S.** Closure to “Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations” / A.S. Vesić. — DOI <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000078> // Journal of the Geotechnical Engineering Division. — 1973. — Т 100. — № 8. — С. 949–952. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/AJGEB6.0000078>. (дата обращения: 02.04.2024).
12. **Денисенко, В.В.** Исследование влияния скорости приложения постоянно возрастающей нагрузки на консолидацию грунтов после нагружения / В.В. Денисенко, П.А. Ляшенко // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". — 2016. — № 15. — С. 1–15. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28141550>. — EDN HQOJYY. (дата обращения: 02.04.2024).
13. **Скибин, М.Г.** Постановка эксперимента по исследованию работы основания регулируемого фундамента при подъеме и выравнивании здания / М.Г. Скибин, М.В. Зотов, А.И. Субботин // Актуальные проблемы фундаментостроения на юге России: материалы Российской научно-практической конференции, посвященной памяти профессоров Ю.Н. Мурзенко, А.П. Пшеничкина, Новочеркасск, 14–15 июля 2010 года / Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет, 2010. — С. 58–64. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30522902&pf=1>. — EDN ZRYGFR. (дата обращения: 12.03.2024).
14. **Saito R.** Experimental study on the rate effect on the shear strength / R. Saito, H. Fukuoka, K. Sassa // Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides: Proceedings of the INTERPRAEVENT International Symposium. — 2006. — С. 421–427. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/309605452\\_Experimental\\_study\\_on\\_the\\_rate\\_effect\\_on\\_the\\_shear\\_strength](https://www.researchgate.net/publication/309605452_Experimental_study_on_the_rate_effect_on_the_shear_strength). (дата обращения: 02.04.2024).
15. **Gutierrez, M.** Non-coaxial version of Rowe’s stress-dilatancy relation / M. Gutierrez, J. Wang. — DOI <https://doi.org/10.1007/s10035-008-0124-0> // Granular Matter. — 2009. — Т 11. — С. 129–137. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10035-008-0124-0>. (дата обращения: 02.04.2024).
16. **Хархута, Н.Я.** Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. — Москва: Транспорт, 1975. — 288 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006957405>. (дата обращения: 02.04.2024).
17. **Дьяков, И.М.** Планирование экспериментальных исследований работы системы "фундамент-основание" при внезапных догружениях / И.М. Дьяков, М.И. Дьяков, Б. Ю. Барыкин. — DOI <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2020-19-5-12> // Строительство и техногенная безопасность. — 2020. — № 19. — С. 5–12. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44515484>. — EDN LHNLGA. (дата обращения: 02.04.2024).
18. **Уласик, Т.М.** Влияние "стесненной" дилатансии на несущую способность свайных фундаментов / Т.М. Уласик // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. — 2015. — № 16. — С. 30–33. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25896172>. — EDN VURVMD. (дата обращения: 02.04.2024).

19. **McDougall, J.R.** Particle loss: An initial investigation into size effects and stress-dilatancy / J.R. McDougall, D. Kelly, D. Barreto. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.002> // Soils and Foundations. — 2019. — Т 59. — № 3. — С. 726–737. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080619300587>. (дата обращения: 02.04.2024).

#### Сведения об авторах:

**Дьяков Игорь Михайлович** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Геотехники и конструктивных элементов зданий», ФГАОУ «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Россия, e-mail: [Karta3@mail.ru](mailto:Karta3@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0636-6401>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=316375](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=316375)

**Дьяков Михаил Игоревич** — ассистент, ФГАОУ «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Россия, e-mail: [dyakov.info.aca@yandex.ru](mailto:dyakov.info.aca@yandex.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=986817](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=986817)

Статья получена: 23.05.2024. Принята к публикации: 12.07.2024. Опубликовано онлайн: 27.07.2024.

## REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Diakov I.M., Grechishnikov S.V., Diakov M.I. Method for Strengthening the Frame of a Multi-Storey Building Under Dimensional Sediments of Foundations. *Building and reconstruction*. 2019;(5): 63–73. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-85-5-63-73>.
2. Diakov I.N., Tsarenko N.V., Diakov M.I. Experimental studies of the "foundation-soil" system operation with sudden loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913: 22064. (In Eng.) DOI: <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/913/2/022064>.
3. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Bushova O.B., Zhukov D.I. Computational Analysis of Methods for Protecting Monolithic Frames of Multi-Storey Buildings with Flat Floors from Progressive Collapse. *Building and reconstruction*. 2021;(4): 35–44. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>.
4. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'yev E.V. Protection of Buildings and Structures Against Progressive Collapse Within the Framework of Legislative and Regulatory Requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019;(2): 46–54. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.02.46-54>.
5. Ter-Martirosyan A.Z. Yieldings of Construction Bases Under Static, Cyclic and Vibration Influences. *Geotechnics*. 2010;(4): 77–81. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17649250> (accessed 12th March 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Alekseyev V.M., Evdokimtsev O.V., Ledenev V.V. Eksperimental'nyye issledovaniya raboty fundamentov pri deystvii tsentral'noy i vneshentrennoy mnogokratno povtornoy nagruzki [Experimental studies of the operation of foundations under the action of central and eccentric repeated loads]. Moscow: VNIITPI; 1998. (In Russ.).
7. Ledenev V.V. [Foundations and bases under complex force effects (experiments). Volume 2: Monograph for researchers, postgraduates and masters students in the construction profile]. Tambov: Tambov State Technical University, EBS ASV; 2015. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29995176> (accessed 12th March 2024). (In Russ.).
8. Jia J. Dynamic and Cyclic Properties of Soils. In: *Soil Dynamics and Foundation Modeling*. Cham: Springer; 2018. p. 75–108. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40358-8\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40358-8_2) (accessed 12th March 2024). (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-40358-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40358-8_2).
9. Ledenev V.V. [Bearing capacity and deformability of foundations and bases under complex force effects: Monograph]. Tambov: Tambov State Technical University, EBS ASV; 2015. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zgiznl> (accessed 12th March 2024). (In Russ.).

10. Siraziev L.F. Experimental Studies of The Stress-Strain State of The Three-Layer Soil Base Under Short-Term Plate-Bearing Test and The Presence of The Water Saturated Layer. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017;(4): 228–236. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30604718> (accessed 2nd April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Vesić A.S. Closure to “Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations”. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1973;100(8): 949–952. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000078>.
12. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Study of Speed Applications Constantly Increasing Load Consolidation of Soils After Loading. *Electronic Network Polythematic Journal "Scientific Works of KUBSTU"*. 2016;(15): 1–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28141550> (accessed 2nd April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
13. Skibin M.G., Zotov M.V., Subbotin A.I. [Setting up an experiment to study the operation of an adjustable foundation base when lifting and leveling a building]. In: [*Current problems of foundation construction in the south of Russia: materials of the Russian scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Yu.N. Murzenko, A.P. Pshenichkin, Novocherkassk, July 14–15, 2010*]. Novocherkassk: South-Russian State Technical University; 2010. p. 58–64. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30522902&pf=1> (accessed 12th March 2024). (In Russ.).
14. Saito R., Fukuoka H., Sassa K. Experimental study on the rate effect on the shear strength. Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides: *Proceedings of the INTERPRAEVENT International Symposium*. 2006; 421–427. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/309605452\\_Experimental\\_study\\_on\\_the\\_rate\\_effect\\_on\\_the\\_shear\\_strength](https://www.researchgate.net/publication/309605452_Experimental_study_on_the_rate_effect_on_the_shear_strength) (accessed 2nd April 2024). (In Eng.).
15. Gutierrez M., Wang J. Non-coaxial version of Rowe’s stress-dilatancy relation. *Granular Matter*. 2009;11: 129–137. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-008-0124-0>.
16. Kharkhuta N.Ya., Vasil'yev Yu.M. [Strength, stability and compaction of roadbed soils]. Moscow: Transport; 1975. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006957405> (accessed 2nd April 2024). (In Russ.).
17. Diakov I.M., Diakov M.I., Barykin B.Y. Planning of Experimental Studies of the "Foundation-Base" System in Case of Sudden Overloads. *Construction and industrial safety*. 2020;(19): 5–12. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2020-19-5-12>.
18. Ulasik T. The Influence Of "Constrained" Dilatancy on The Bearing Capacity of Piles Foundations. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied sciences*. 2015;(16): 30–33. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25896172> (accessed 2nd April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
19. McDougall J.R., Kelly D., Barreto D. Particle loss: An initial investigation into size effects and stress-dilatancy. *Soils and Foundations*. 2019;59(3): 726–737. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.002>.

---

#### Information about the authors:

**Igor M. Diakov** — Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia,  
e-mail: Karta3@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0636-6401>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=316375](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=316375)

**Mikhail I. Diakov** — Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia,  
e-mail: dyakov.info.aca@yandex.ru

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=986817](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=986817)

---

Submitted: 23rd May 2024. Revised: 12th July 2024. Published online: 27th July 2024.