

Результаты экспериментальных исследований взаимодействия моделей перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания при влиянии карстово-обвальных процессов / С.И. Евтушенко, Е.В. Зеленин, Б.Ю. Барыкин, А.Б. Барыкин // Construction and Geotechnics. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 26–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.03

Evtushenko S.I., Zelenin E.V., Barykin B.Yu., Barykin A.B. Results of experimental studies of interaction between cross-beam foundation models and sloping foundation under the influence of karst-rockfall processes. *Construction and Geotechnics*. 2024. Vol. 15. No. 3. Pp. 26-41. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.03

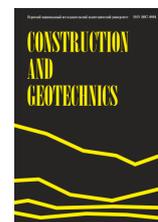


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 3, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.03

УДК 624.131.541.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕКРЕСТНО-БАЛОЧНОГО ФУНДАМЕНТА И НАКЛОННОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ ВЛИЯНИИ КАРСТОВО-ОБВАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

С.И. Евтушенко², Е.В. Зеленин¹, Б.Ю. Барыкин¹, А.Б. Барыкин¹

¹Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение), Симферополь, Российская Федерация

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 03 июня 2024
Одобрена: 10 июля 2024
Принята к публикации:
27 сентября 2024

Ключевые слова:

модельные исследования,
карст, перекрестно-балочный
фундамент, наклонное
основание, склон.

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты физического моделирования взаимодействия перекрестно-балочного фундамента и наклонного грунтового основания ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ$) при образовании карстово-обвальных процессов. Целью проводимых исследований являлось изучение влияния угла наклона основания, диаметра карстовой полости и ее месторасположения на параметры напряженно-деформируемого состояния работы перекрестно-балочного фундамента, ограниченного жесткой вертикальной стенкой в нижней части склона, при внезапном обрушении свода карстовой полости. Описана методика планирования исследований, силовое и измерительное оборудование. По полученным результатам проведенных экспериментальных исследований был проведен анализ влияния основных факторов (угла наклона основания, размера диаметра карстовой полости, месторасположения карстовой полости относительно удерживающей конструкции и подошвы фундамента) на изменения осадок, характера распределения нормальных контактных напряжений. Эмпирически получены параметры изменения формы и радиуса воронки на границе опирания фундамента на основание. Полученные результаты дают возможность оценить изменения параметров напряженно-деформированного состояния работы перекрестно-балочного фундамента после обрушения свода полости и образования сложной формы призмы обрушения, определить критерии наиболее неблагоприятного расположения карстовой полости относительно конструкций перекрестно-балочного фундамента. Получена аналитическая формула, позволяющая определить ориентировочное значение расчетного диаметра D_k полости в наклонном основании.

© **Евтушенко Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: sergand1957@gmail.com.

Зеленин Евгений Владимирович – аспирант, e-mail: workandearn@mail.ru.

Барыкин Борис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: dekan.asf@mail.ru.

Барыкин Александр Борисович – кандидат технических наук, e-mail: aleksbarykin@yandex.com.

Sergei I. Evtushenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sergand1957@gmail.com.

Evgenii V. Zelenin – Postgraduate Student, e-mail: workandearn@mail.ru.

Boris Yu. Barykin – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: dekan.asf@mail.ru.

Aleksandr B. Barykin – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: aleksbarykin@yandex.com.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF INTERACTION BETWEEN CROSS-BEAM FOUNDATION MODELS AND SLOPING FOUNDATION UNDER THE INFLUENCE OF KARST-ROCKFALL PROCESSES

S.I. Evtushenko², E.V. Zelenin¹, B.Yu. Barykin¹, A.B. Barykin¹

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University Institute “Academy of building and architecture” (structural unit), Simferopol, Russian Federation

²National Research University Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 03 June 2024
Approved: 10 July 2024
Accepted for publication:
27 September 2024

Keywords:

modeling studies, karst, cross-beam foundation, sloping foundation, slope.

ABSTRACT

The results of physical modeling of interaction between cross-beam foundation and inclined ground ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ$) at formation of karst-rockfall processes are presented. The purpose of the research was to study the influence of the base slope angle, karst cavity diameter and its location on the parameters of the stress-strain state of the cross-beam foundation bounded by a rigid vertical wall in the lower part of the slope in case of sudden collapse of the karst cavity vault. The methodology of research planning, force and measuring equipment is described. According to the obtained results of the experimental studies, the influence of the main factors (the angle of inclination of the foundation, the size of the karst cavity diameter, the location of the karst cavity relative to the retaining structure and the foundation footing) on the changes in settlement, the nature of the distribution of normal contact stresses was analyzed. The parameters of change in the shape and radius of the sinkhole at the boundary of the foundation resting on the base were obtained empirically. The obtained results make it possible to evaluate changes in the VAT parameters of the cross-beam foundation operation after the cavity vault collapse and formation of a complex shape of the collapse prism, to determine the criteria of the most unfavorable location of the karst cavity in relation to the cross-beam foundation structures. The analytical formula allowing to determine the approximate value of the design diameter D_k of the cavity is obtained.

Введение

Южный берег Крыма всегда привлекал своим климатом, что мотивировало правительство современной России создавать там рекреационные, оздоровительные центры. На сегодняшний день большая часть удобных площадок, пригодных для строительства на южном берегу Крыма, практически застроена, что подталкивает инвесторов, застройщиков использовать территории, которые ранее не рассматривались ввиду неблагоприятных экзогенных процессов. Одним из таких неблагоприятных процессов в Крыму является карст, где площадь его развития составляет почти $\frac{3}{4}$ от общей площади территории. Южный берег полуострова на основе оценки устойчивости территории по плотности карстовых воронок имеет уровень потенциальной карстопасности от весьма высокого до катастрофического [1, 2].

В отечественной и зарубежной литературе и нормативных документах [2–6] карстовые деформации могут характеризоваться провалами в виде опусканий земной поверхности с обрушением толщи грунтов, оседаниями, провалами с образованием мульды, оседаниями по периметру. Традиционные подходы к оценке карстопасности на горизонтальном основании направлены на определение расчетного диаметра провала, которые сводятся к применению аналитических моделей А. Бирбаумера [7] или методикам, изложенным в работах А.В. Аникеева [8, 9]. Определение расчетного диаметра карстового провала сводится к ус-

ловию равновесия круглоцилиндрического столба D , в котором действуют две противоположные силы: сдвигающая Q и удерживающая T .

При застройке территорий с углом наклона выше 15° возможно применение принципа отказа от террасирования с устройством перекрестно-балочных фундаментов [10, 11], которые укладываются на плоско спланированную поверхность, что существенно сокращает затраты при проведении земляных работ. Анализ работ [11, 12] показал, что применение существующих методик, основанных на классических подходах к определению расчетного диаметра карстового провала, ограничивает их применение в условиях наклонного основания, так как форма сдвигаемого грунта будет иметь более сложную поверхность, чем цилиндрическая, что приводит к погрешностям в расчетах. Таким образом, исследования, направленные на изучение влияния угла наклона основания, диаметра карстового образования, а также его месторасположения на трансформацию расчетного диаметра карстовой воронки D_k в случае возникновения провала, позволят оценить изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) наклонного основания на этапе проектирования и предусмотреть необходимые противокарстовые мероприятия при освоении наклонных участков гористой местности в РФ.

Методика модельных исследований

Для возможности оценки влияния угла наклона основания на изменения диаметра карстовой полости D_k в карстующихся грунтах были выполнены модельные исследования. Факторами, от которых зависит характер кривизны и протяженность участков диаграммы деформирования грунта, изменение нормальных контактных напряжений, являются площадь подошвы фундамента, форма, глубина заложения фундамента, карстовой полости, угла наклона основания, а также механические свойства грунта. Поскольку на напряженно-деформированное состояние основания под перекрестно-балочным фундаментом одновременно влияет неограниченно большое число факторов, исходя из условий проведения эксперимента были определены наиболее существенные факторы. На первом этапе исследования в рассмотрение включалось большое количество факторов и проводилась теоретическая оценка весомости каждого из них.

Рассматриваемые факторы были разбиты на две группы: статические, связанные с геометрическими параметрами, и геологические.

Было выделено четыре наиболее влиятельных фактора (табл. 1, 2).

Таблица 1

Варьируемые факторы в натуральном масштабе

Table 1

Variable factors on a natural scale

Фактор	Область определения	Область интереса
X1 – диаметр полости, м	2,5–5	2,5–5
X2 – расстояние от подошвы фундамента до центра полости, м	6–8	6–8
X3 – расстояние от удерживающей конструкции до центра полости, м	4–10	4–10
X4 – угол наклона основания α , град	15–30	15–30

Таблица 2

Варьируемые факторы с использованием линейного масштаба (М 1:20)

Table 2

Variable factors using linear scale (M 1:20)

Фактор	Область определения	Область интереса
X1 – диаметр полости, м	0,1–0,2	0,1–0,2
X2 – расстояние от подошвы фундамента до центра полости, м	0,3–0,4	0,3–0,4
X3 – расстояние от удерживающей конструкции до центра полости, м	0,2–0,5	0,2–0,5
X4 – угол наклона основания α , град	15–30	15–30

Согласно литературным данным [13] искомый план должен быть двухуровневым, ортогональным и ротабельным. Этим требованиям удовлетворяет факторный эксперимент типа 2^4 . Ввиду наличия значительного количества факторов и трудоемкости реализации полнофакторного эксперимента, был использован дробный факторный эксперимент с планом дробной реплики типа 2^{4-1} с разрешающей способностью III. Число опытов для дробных реплик – 8 (табл. 3).

Таблица 3

Матрица планирования

Table 3

Planning matrix

Номер опыта	X0	X1	X2	X3	X4	Экспериментально D_k , м	Аналитически D_k , м
1	+1	1	-1	-1	-1	0,129	0,139
2	+1	+1	-1	-1	+1	0,375	0,374
3	+1	-1	+1	-1	+1	0,246	0,237
4	+1	+1	+1	-1	-1	0,311	0,293
5	+1	-1	-1	+1	+1	0,196	0,214
6	+1	+1	-1	+1	-1	0,279	0,271
7	+1	-1	+1	+1	-1	0,135	0,134
8	+1	+1	+1	+1	+1	0,359	0,369

Перекрестно-балочный фундамент моделировался в виде металлического штампа из прямоугольных труб сечением 40×40 мм в виде перекрестных лент (рис. 1, а). Была запроектирована система из двух пролетов общей длиной 640 мм по направлению склона и один пролет шириной 340 мм в поперечном направлении. Карстовая полость моделируется в виде физического устройства в виде прямоугольной оболочки формы параллелепипеда длиной $L = 750$ мм, выполненной из листовой стали толщиной $t = 3$ мм, разделенного металлическими перегородками на три равные отсека толщиной $t = 3$ мм оболочки для возможности вариации месторасположения полостей под конструкцией модели фундамента (рис. 1, б).

Материалом основания при физическом моделировании служил эквивалентный грунт, состоящий из 95 % мелкого кварцевого песка и 5 % гидравлического масла. Перед монтажом модели фундамента в проектное положение на грунтовое основание устанавливались тензометрические месдозы диаметром 26 мм толщиной 5 мм распределительной упругой пластиной вниз после чего производилась равномерная их засыпка просеянным песком. Регистрация безразмерных показаний месдоз производилась с помощью прибора ИДЦ-1. С целью минимизации погрешностей и систематических ошибок, месдозы перед проведением исследований были проградуированы в специальной установке под жестким штампом. Параметры осадок модели перекрестно-балочного фундамента измеряли с помощью прогибомеров БПАО и индикаторов часового типа ИЧ, которые устанавливались на отдельную металлическую раму для исключения погрешности измерений (рис. 2).



Рис. 1. Модель фундамента, карстовой полости: *a* – модель перекрестно-балочного фундамента, *b* – модель карстовой полости

Fig. 1. *a* – model of cross-beam foundation, *b* – model of karst cavity

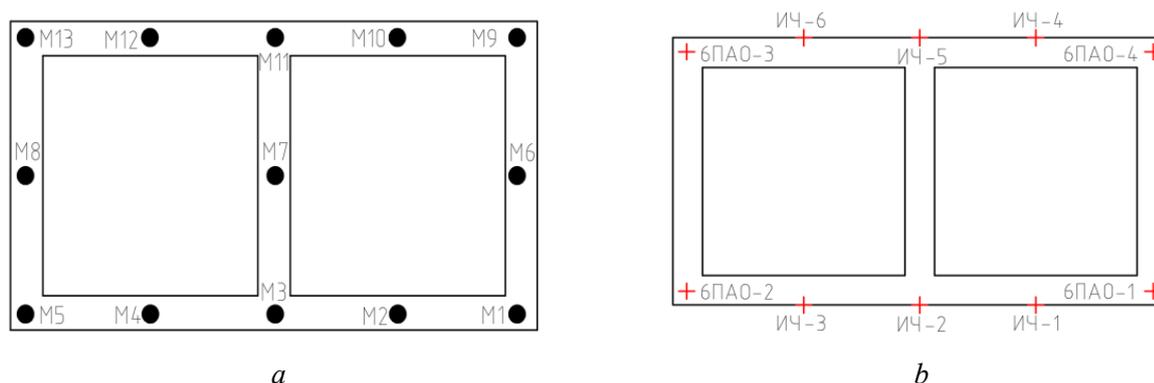


Рис. 2. Схема установки измерительных приборов:
a – схема расположения месдоз, *b* – схема расположения датчиков прогиба

Fig. 2. Installation diagram for measuring instruments:
a – mesdosis layout, *b* – layout diagram of deflection gauges

Загружение модели фундамента производилось штучными грузами ступенями по 15 кг. Выдержка интервала каждого нагружения составляла не менее 5 мин. Запись показаний с регистрирующей аппаратуры производилась после выдержки.

При проведении экспериментальных исследований с помощью вышеописанных измерительных приборов фиксировали следующие параметры: нормальные контактные давления, осадки под конструкцией модели перекрестно-балочного Ф-1 до обрушения свода полости и после обрушения.

Анализ результатов физического моделирования

Результаты физического моделирования приведены на рис. 3–10.

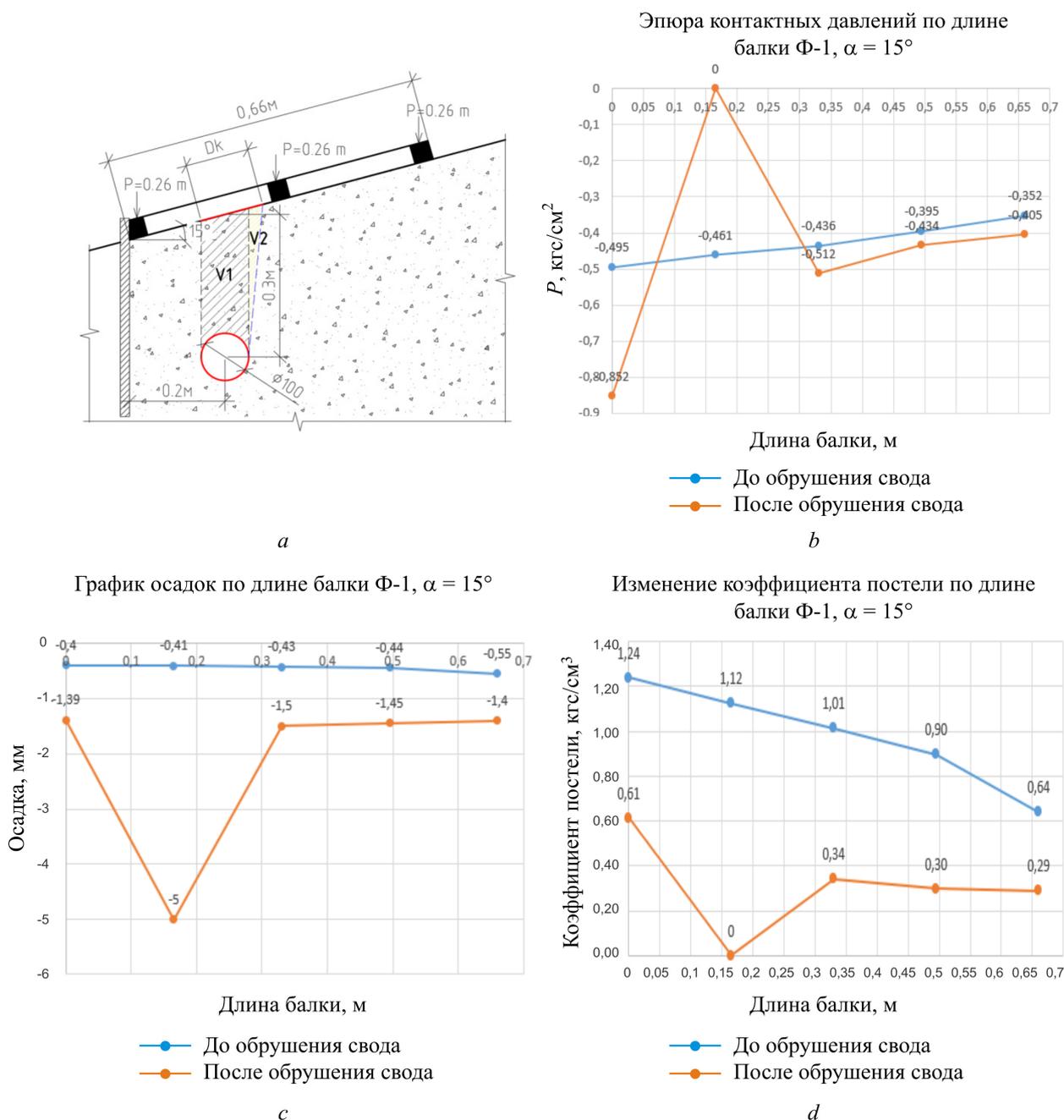
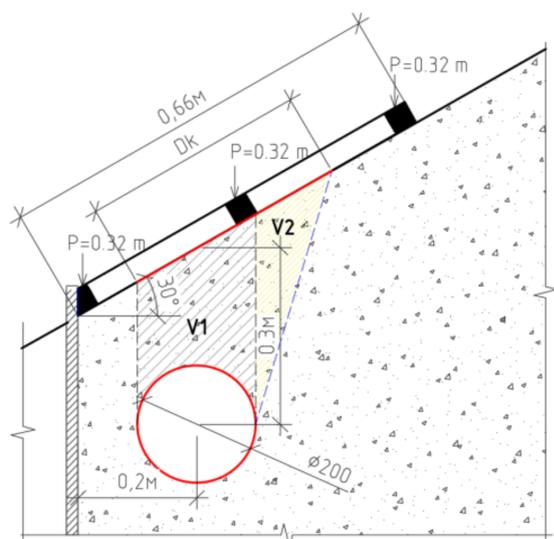
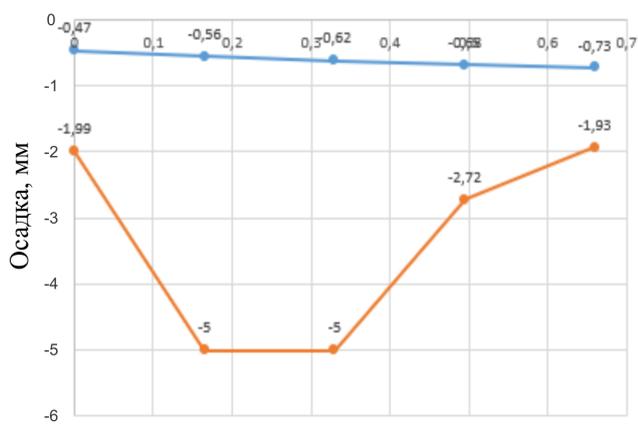


Рис. 3. Результаты эксперимента № 1: а – схема эксперимента; б – эпюра контактных давлений по длине балки; в – график осадок по длине балки; г – изменение коэффициента постели по длине балки
 Fig. 3. Results of the experiment no. 1: а – scheme of the experiment; б – epuray of contact pressures along the length of the beam; в – graph of settlements along the length of the beam; г – variation of bed coefficient along the length of the beam



a

График осадок по длине балки Ф-1, $\alpha = 30^\circ$

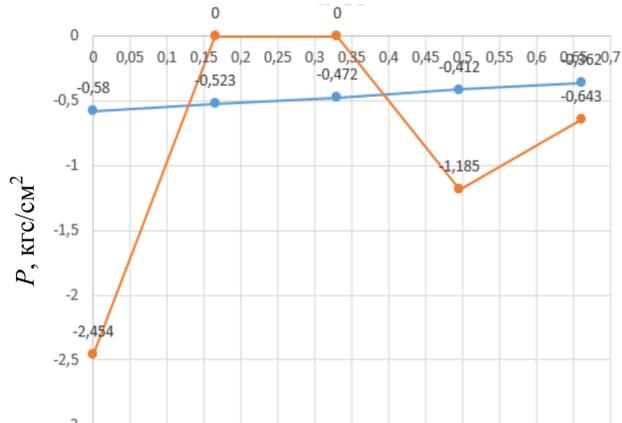


Длина балки, м

● До обрушения свода
 ● После обрушения свода

c

Эпюра контактных давлений по длине балки Ф-1, $\alpha = 30^\circ$

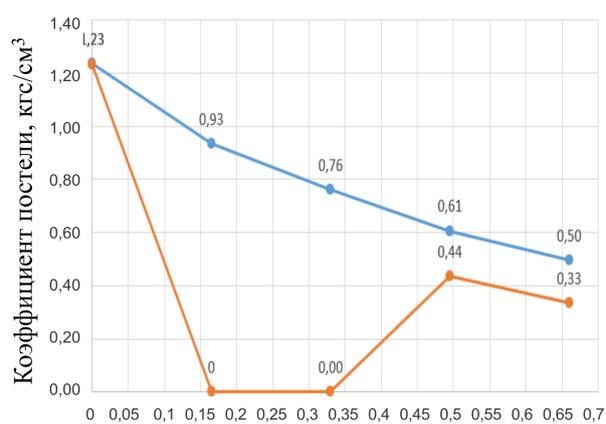


Длина балки, м

● До обрушения свода
 ● После обрушения свода

b

Изменение коэффициента постели по длине балки Ф-1, $\alpha = 30^\circ$



Длина балки, м

● До обрушения свода
 ● После обрушения свода

d

Рис. 4. Результаты эксперимента № 2: a – схема эксперимента; b – эпюра контактных давлений по длине балки; c – график осадок по длине балки; d – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 4. Results of the experiment no. 2: a – scheme of the experiment; b – epuray of contact pressures along the length of the beam; c – graph of settlements along the length of the beam; d – variation of bed coefficient along the length of the beam

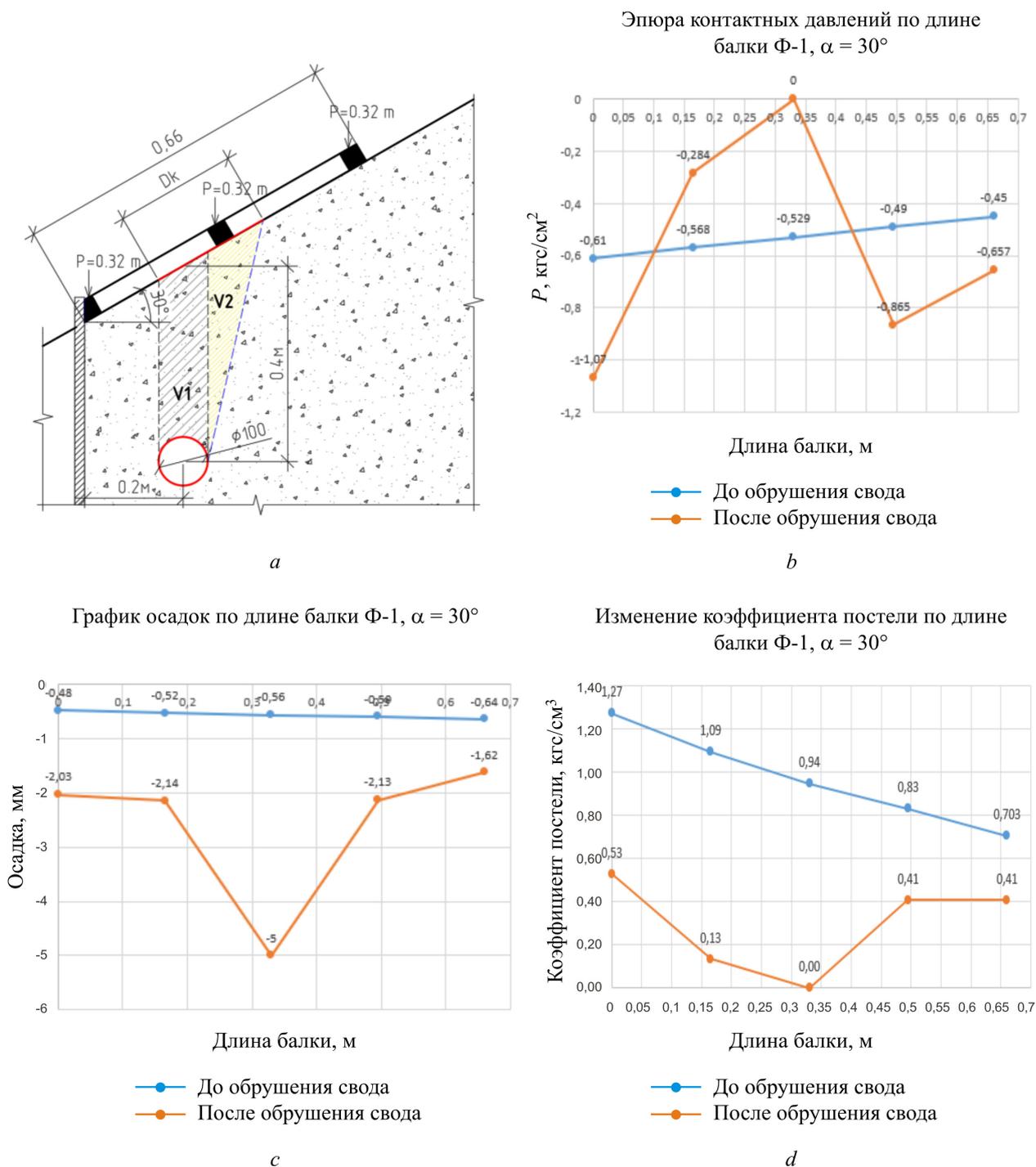
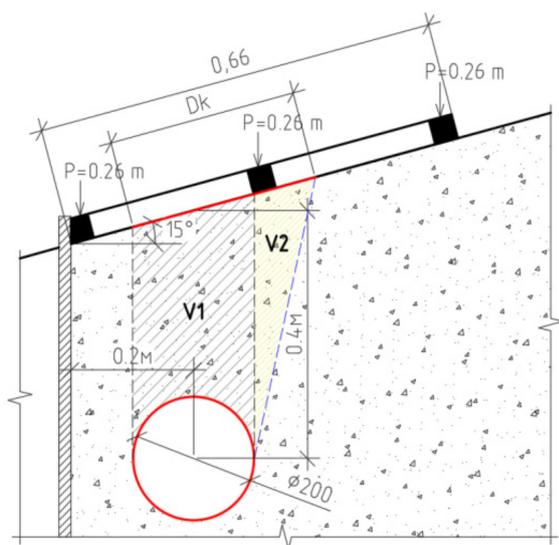


Рис. 5. Результаты эксперимента № 3: *a* – схема эксперимента; *b* – эпюра контактных давлений по длине балки; *c* – график осадок по длине балки; *d* – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 5. Results of the experiment no. 3: *a* – scheme of the experiment; *b* – epuray of contact pressures along the length of the beam; *c* – graph of settlements along the length of the beam; *d* – variation of bed coefficient along the length of the beam



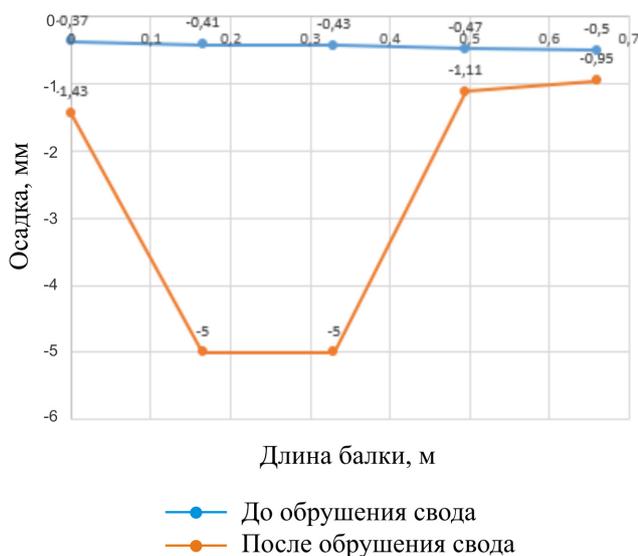
a

Эпюра контактных давлений по длине балки Ф-1, $\alpha = 15^\circ$



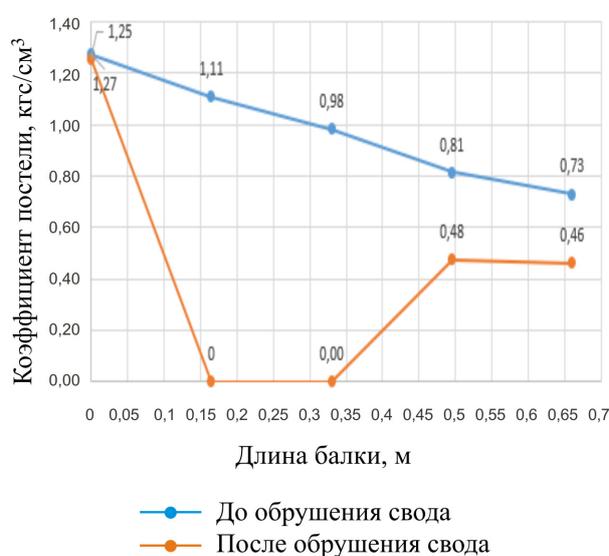
b

График осадок по длине балки Ф-1, $\alpha = 15^\circ$



c

Изменение коэффициента постели по длине балки Ф-1, $\alpha = 15^\circ$



d

Рис. 6. Результаты эксперимента № 4: a – схема эксперимента; b – эпюра контактных давлений по длине балки; c – график осадок по длине балки; d – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 6. Results of the experiment no. 4: a – scheme of the experiment; b – epuray of contact pressures along the length of the beam; c – graph of settlements along the length of the beam; d – variation of bed coefficient along the length of the beam

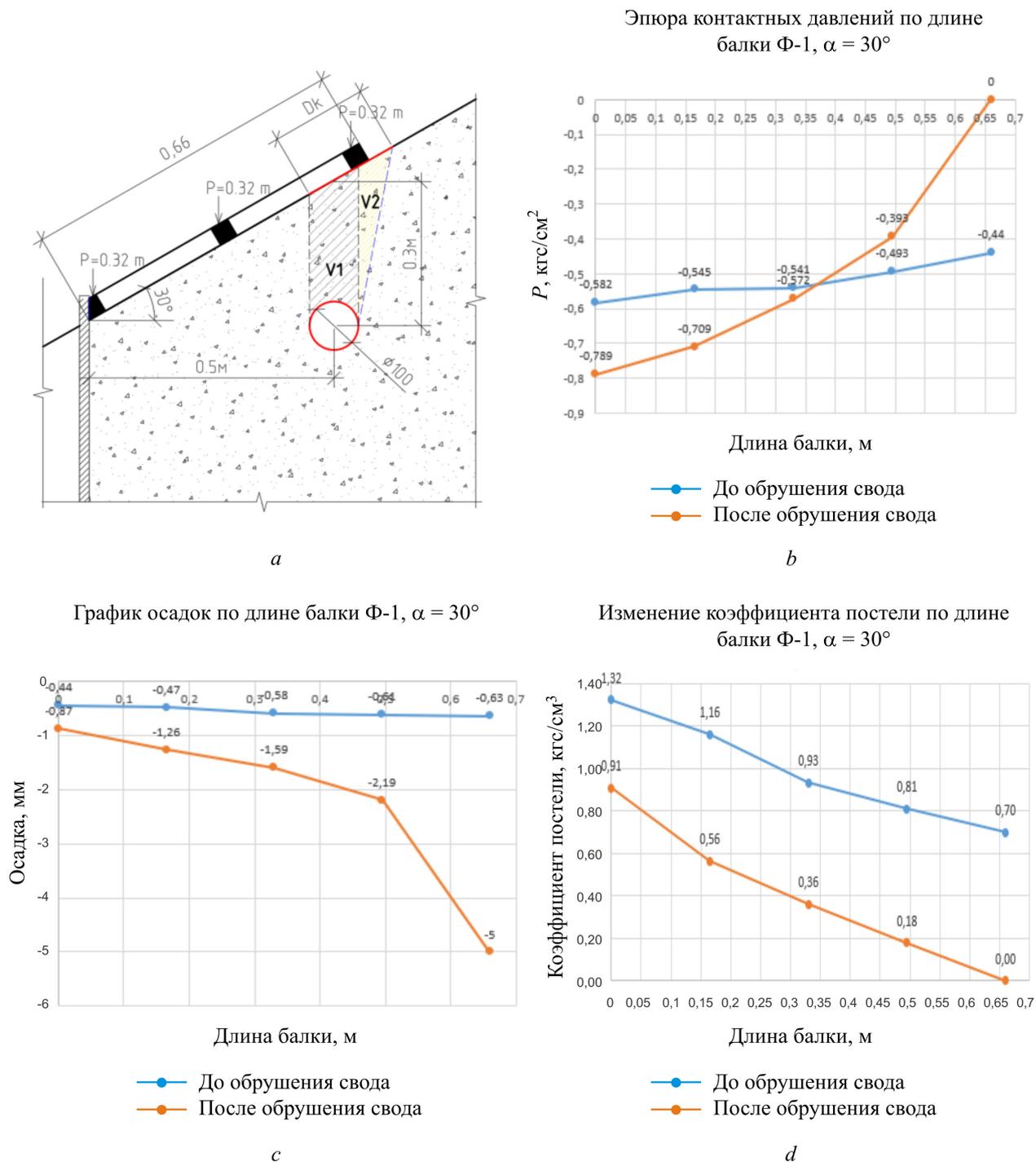


Рис. 7. Результаты эксперимента № 5: *a* – схема эксперимента; *b* – эпюра контактных давлений по длине балки; *c* – график осадок по длине балки; *d* – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 7. Results of the experiment no. 5: *a* – scheme of the experiment; *b* – epuray of contact pressures along the length of the beam; *c* – graph of settlements along the length of the beam; *d* – variation of bed coefficient along the length of the beam

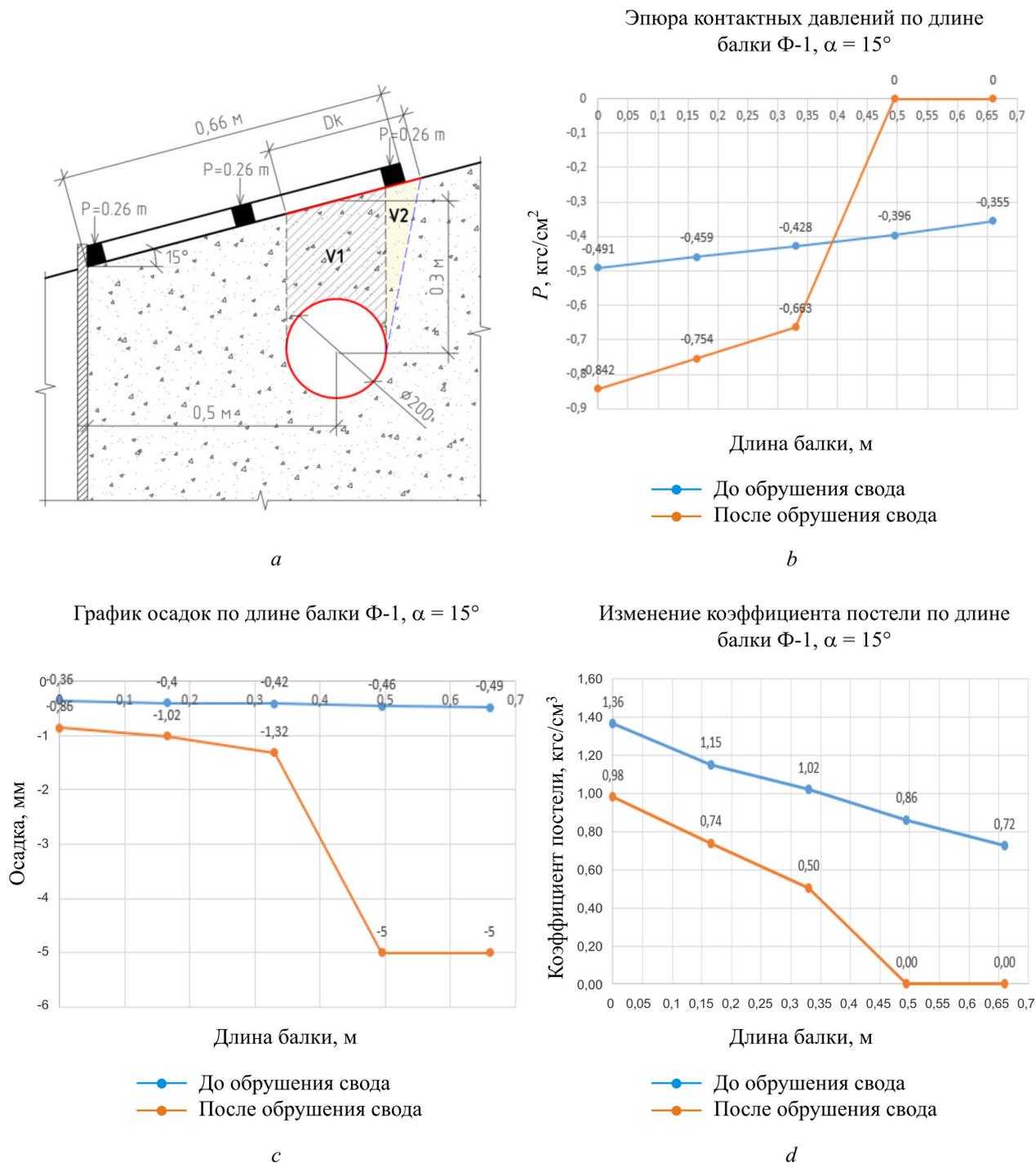


Рис. 8. Результаты эксперимента № 6: *a* – схема эксперимента; *b* – эпюра контактных давлений по длине балки; *c* – график осадок по длине балки; *d* – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 8. Results of the experiment no. 6: *a* – scheme of the experiment; *b* – epuray of contact pressures along the length of the beam; *c* – graph of settlements along the length of the beam; *d* – variation of bed coefficient along the length of the beam

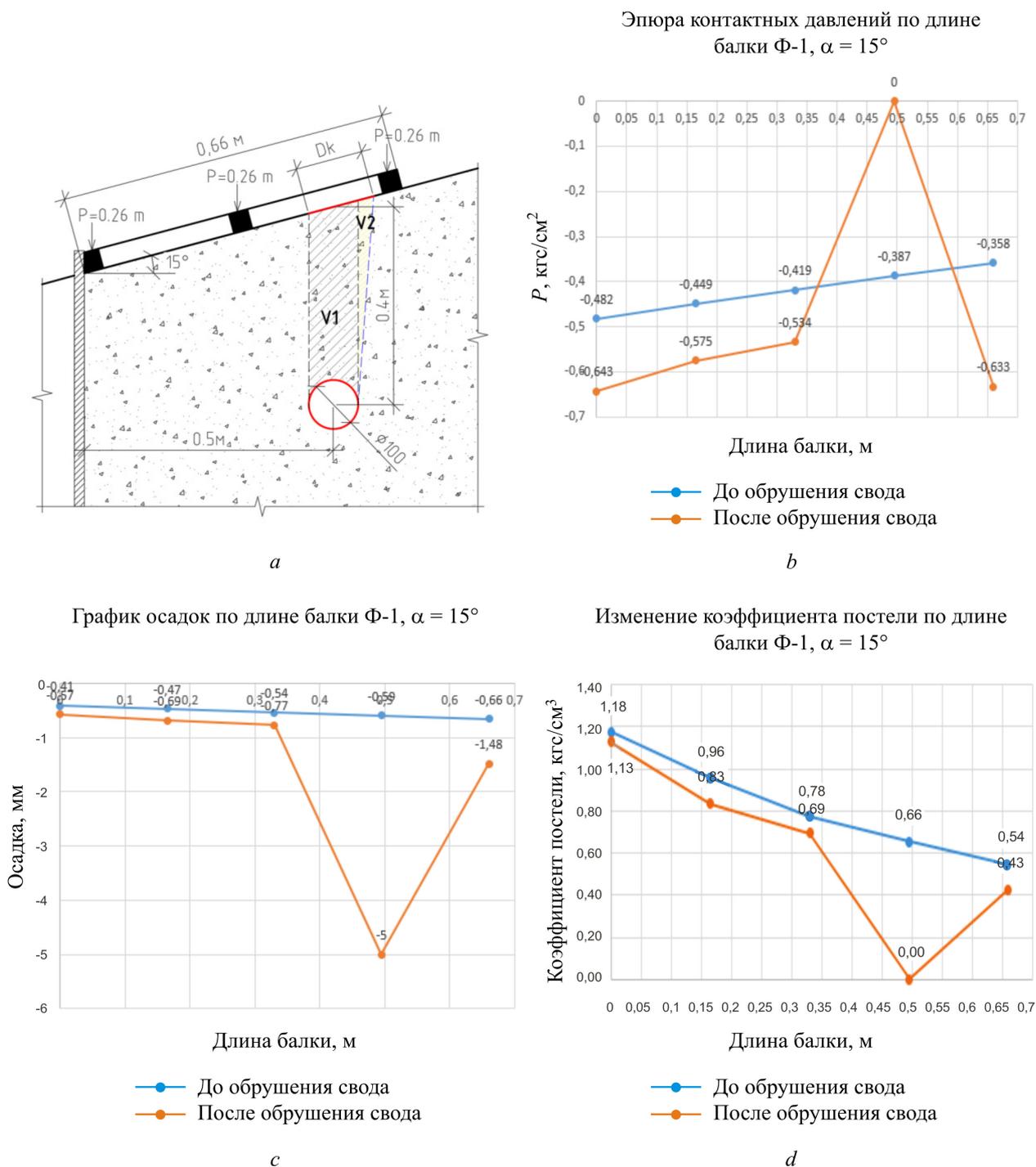


Рис. 9. Результаты эксперимента № 7: *a* – схема эксперимента; *b* – эпюра контактных давлений по длине балки; *c* – график осадок по длине балки; *d* – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 9. Results of the experiment no. 7: *a* – scheme of the experiment; *b* – epuray of contact pressures along the length of the beam; *c* – graph of settlements along the length of the beam; *d* – variation of bed coefficient along the length of the beam

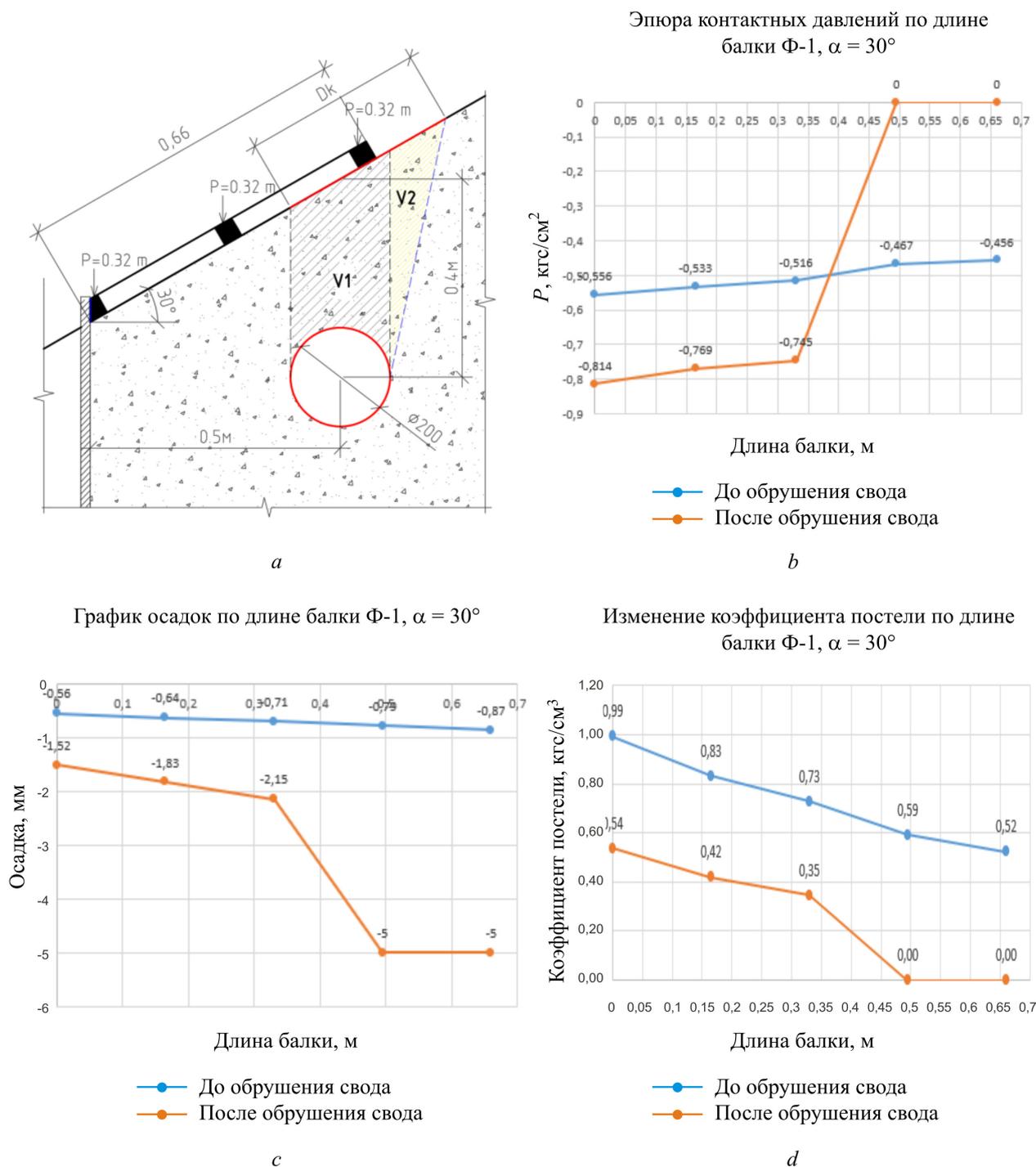


Рис. 10. Результаты эксперимента № 8: *a* – схема эксперимента; *b* – эпюра контактных давлений по длине балки; *c* – график осадок по длине балки; *d* – изменение коэффициента постели по длине балки

Fig. 10. Results of the experiment no. 8: *a* – scheme of the experiment; *b* – epuray of contact pressures along the length of the beam; *c* – graph of settlements along the length of the beam; *d* – variation of bed coefficient along the length of the beam

Анализ графиков изменения контактных давлений на рис. 3–10 позволил выявить следующие особенности НДС наклонного основания при наличии карстовой полости:

– до обрушения свода полости и выхода карста на поверхность наблюдалась тенденция перераспределения нормальных контактных напряжений, описанных в работе [8], разница между контактными нормальными напряжениями в верхней части склона и возле удерживающей конструкции составляла 1,29 раз при угле наклона основания в 15° и 1,6 раз при угле наклона основания в 30° . После обрушения свода полости и выхода карста на поверхность тенденция перераспределения контактных напряжений сохранилась, однако приобрела выраженные скачки ординат по направлению падения склона. Разница между контактными нормальными напряжениями в верхней части склона и возле удерживающей конструкции составляла 1,1–4,1 раза;

– осадки до обрушения свода полости и выхода карста на поверхность показывают противоположную тенденцию, в которой осадки в приопорной части модели фундамента затухают и развиваются по направлению роста склона, в большей степени осадки увеличиваются, приближаясь к месту провала, что объясняется появлением участков разуплотненных зон. Увеличение средней осадки после провала под моделями перекрестно-балочного фундамента составило от 1,64 до 3,35 раз. Стоит отметить, что на увеличение средней осадки оказывал наибольшее влияние именно угол наклона основания.

Аналитическое решение для определения расчетного диаметра карстовой полости в наклонном основании было получено по результатам статистической обработки данных табл. 3. В результате регрессионного анализа установлена связь между исходным диаметром карстовой полости D (м), глубиной залегания карстовой полости H (м), расстоянием до удерживающей конструкции L (м) и углом наклона основания α° . Получена линейная зависимость $D_k = f(D, H, L, \alpha)$. С помощью метода наименьших квадратов были определены коэффициенты и получено основное уравнение регрессии к определению параметра D_k .

$$D_k = -0,128 + 1,545D + 0,18H - 0,076L + 0,295\alpha.$$

Максимальное расхождение экспериментальных данных с данными, полученными по формуле, составило не более 8 %, поэтому его можно использовать в предпроектных работах для расчета предварительного диаметра карстовой полости, которая выходит на поверхность склона.

Выводы

1. В соответствии с программой проведенных экспериментальных исследований при использовании математического планирования опытов было произведено 8 серий испытаний совместной работы перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания при наличии карстово-обвальных процессов с учетом изменения угла наклона основания, диаметра карстовой полости и ее месторасположения.

2. Экспериментально выявлены особенности взаимодействия перекрестно-балочных фундаментов с наклонным основанием, осложненным карстовыми явлениями, с получением основных параметров НДС наклонного основания (осадки, нормальные контактные напряжения, коэффициенты жесткости) после обрушения свода полости и выхода ее на поверхность.

3. Экспериментально установлена форма сдвигаемого массива грунта в виде наклонного усеченного конуса, что позволит в дальнейшем изменить подход к определению рас-

четного диаметра карстового провала под конструкцией фундамента для проведения инженерных расчетов при проектировании зданий и сооружений на наклонных основаниях.

4. Полученные результаты проведенных экспериментальных исследований позволят уточнить методику определения расчетного диаметра карстового провала под подошвой перекрестно-балочного фундамента в наклонном основании с разработкой расчетной модели определения ординат эпюры нормальных контактных напряжений, что обеспечит более точный расчет основных параметров НДС основания и конструкций фундаментов на этапе проектирования.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликты интересов. Авторы заявляют об отсутствии интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Особенности инженерных изысканий на закарстованных территориях в пределах Крымского п-ва / Г.Н. Амеличев, Б.А. Вахрушев, Г.В. Самохин, С.В. Токарев // Материалы общерос. науч.-практ. конф. «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях». – М., 2023. – С. 72–92.
2. Вахрушев, Б.А. Районирование карста Крымского полуострова / Б.А. Вахрушев // *Speleology and Karstology*. – 2009. – № 3. – С. 39–46.
3. Waltham, T. Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction / T. Waltham, F. Bell, M. Culshaw. – Springer Praxis, 2005.
4. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. – М.: НИИОСП, 1985.
5. Барыкин, А.Б. Экспериментально-теоретические основы взаимодействия перекрестно-балочных фундаментов с наклонным основанием: дис. ... канд. техн. наук / А.Б. Барыкин. – Волгоград, 2018. – 184 с.
6. Барыкин, Б.Ю. Взаимодействие перекрестно-ленточного фундамента на склоне с песчаным основанием: дис. ... канд. техн. наук / Б.Ю. Барыкин. – Днепропетровск, 1990. – 271 с.
7. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: АСВ, 2023. – 1084 с.
8. Аникеев, А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска / А.В. Аникеев. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.
9. Аникиев, А.В. Об использовании модели Бирбаумера в инженерном карстведении / А.В. Аникиев // Сергеевские чтения. Моделирование при решении геоэкологических задач. Вып. 11. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23–24 марта 2009 г.). – М., 2009.
10. Барыкин, А.Б. Модельные исследования деформаций оснований перекрестно-балочных фундаментов на склонах / А.Б. Барыкин // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2017. – № 3 (272). – С. 68–75.
11. Барыкин, Б.Ю. К вопросу численного моделирования работы перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании в условиях активизации карстовых процессов / Б.Ю. Барыкин, Е.В. Зеленин // *Передовое развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф.* – Петрозаводск, 2020. – С. 28–38.
12. Евтушенко, С.И. Модельные исследования взаимодействия перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания над карстовой полостью / С.И. Евтушенко, Е.В. Зеленин // *Строительство и архитектура*. – 2023. – Т. 11, № 4. – С. 8.
13. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

References

1. Amelichev G.N., Vakhrushev B.A., Samokhin G.V., Tokarev S.V. Peculiarities of engineering surveys in the karst territories within the Crimean Peninsula. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Study of Hazardous Natural Processes and Geotechnical Monitoring in Engineering Surveys"*. Moscow, 2023, pp. 72-92.
2. Vakhrushev B.A. Karst zonation of the Crimean Peninsula. *Speleology and Karstology*, 2009, no. 3, pp. 39-46.
3. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer Praxis, 2005.
4. Recommendations on design of foundations in karst territories. Moscow, NIIOSP, 1985.
5. Barykin A.B. Experimental-theoretical bases of interaction of cross-beam foundations with sloping base. Ph. D. thesis. Volgograd, 2018, 184 p.
6. Barykin, B.Yu. Interaction of cross-tape foundation on the slope with sandy base. Ph. D. thesis. Dnepropetrovsk, 1990, 271 c.
7. Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. 3rd ed. Eds. V.A. Ilichev, R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2023, 1084 p.
8. Anikeev A.V. Falls and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment. Moscow, RUDN, 2017, 328 p.
9. Anikiev A.V. On the use of Birbaumer's model in engineering karstology. *Sergeev Readings. Modeling in solving geo-ecological problems. Issue 11. Proceedings of the Annual Session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology* (March 23-24, 2009). Moscow, 2009.
10. Barykin A.B. Model studies of deformations of cross-beam foundations on slopes. *Structural mechanics and calculation of structures*, 2017, no. 3 (272), pp. 68-75.
11. Barykin B.Yu., Zelenin E.V. To the question of numerical modeling of cross-beam foundation operation on the sloping base in the conditions of karst processes activation. *Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference*. Petrozavodsk, 2020, pp. 28-38.
12. Evtushenko S.I., Zelenin E.V. Modeling studies of interaction of cross-beam foundation and sloping foundation over karst cavity. *Construction and Architecture*, 2023, vol. 11, no. 4, p. 8.
13. Adler Yu.P [et al.]. Planning of experiment at search of optimal. Moscow, Nauka, 1976, 279 p.