

## САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 1889 Г.: ПЕРВОЕ ФОТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТА ПОД ФУНДАМЕНТОМ

*Х. ХРИСТОВ – профессор, FVI, г. Карлсруэ, Германия/ Технический Университет, г. Будапешт, Венгрия.*

*Памяти профессора Б. И. Далматова*

В феврале 1889 г. инженер В. И. Курдюмов провел в лаборатории Института инженеров путей сообщения в Санкт-Петербурге первое экспериментальное исследование разрушения грунта под фундаментом с помощью фотографирования призм выпирания грунта. Его вторая публичная лекция с результатами этих экспериментов прочтена им в Санкт-Петербурге 11 декабря 1889 г. и опубликована в печати в 1891 г. В докладе дается краткий обзор экспериментов и результатов Курдюмова и их значение для развития механики грунтов. Автор данной статьи открыл в работах Профессора Терцаги заметку, что он пользовался результатами Курдюмова при выводе его формулы несущей способности оснований.

### ВВЕДЕНИЕ

1703 г. – год рождения северной столицы России Петра Великого – Санкт-Петербурга. Город быстро стал центром развития науки и техники. Много блестящих ученых и инженеров работали в этом городе.

В 1707 г. в Базеле (Швейцария) родился самый плодотворный математик восемнадцатого столетия: Леонард Эйлер (1707–1783), который 32 года своей жизни проработал в Петербурге: в 1726–1741 и 1766–1783 гг. Его 886 книг и статей посвящены различным областям чистой и прикладной математики артиллерии, гидравлики, преломления лучей света и др.

В 1869 г. Д. И. Менделеев (1834–1907) открыл в Петербурге периодический закон элементов. В Петербурге работали также такие блестящие математики, как П. Л. Чебышев (1821–1894) и его ученики И. И. Золоторев (1847–1878), А. А. Марков (1856–1922), А. М. Ляпунов (1857–1918), В. А. Стеклов (1864–1926) и другие, составившие знаменитую Петербургскую математическую школу. А. С. Попов (1859–1906) в мае 1895 г. успешно провел первую в мире радиопередачу.

Практика возведения монументальных зданий способствовала развитию в Петербурге строительных наук, в том числе и механики грунтов. Первый курс «Основания и фундаменты» в России был издан в Петербурге в 1869 г. военным инженером, профессором В. М. Карловичем (1834–1892).

Здесь достаточно напомнить о легендарном Институте инженеров путей сообщения. В лаборатории этого института в начале февраля 1889 г. русский инженер, профессор В. И. Курдюмов провел первое в мире экспериментальное исследование разрушения грунта под фундаментом с помощью непосредственного фотографирования призм выпирания грунта. Результаты этих экспериментов он сообщил в своей второй публичной лекции 11 декабря 1889 г., которая была напечатана в 1891 г. (рис. 1).

### 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ КУРДЮМОВА

Работа Курдюмова относится к историческому развитию вопроса об определении несущей

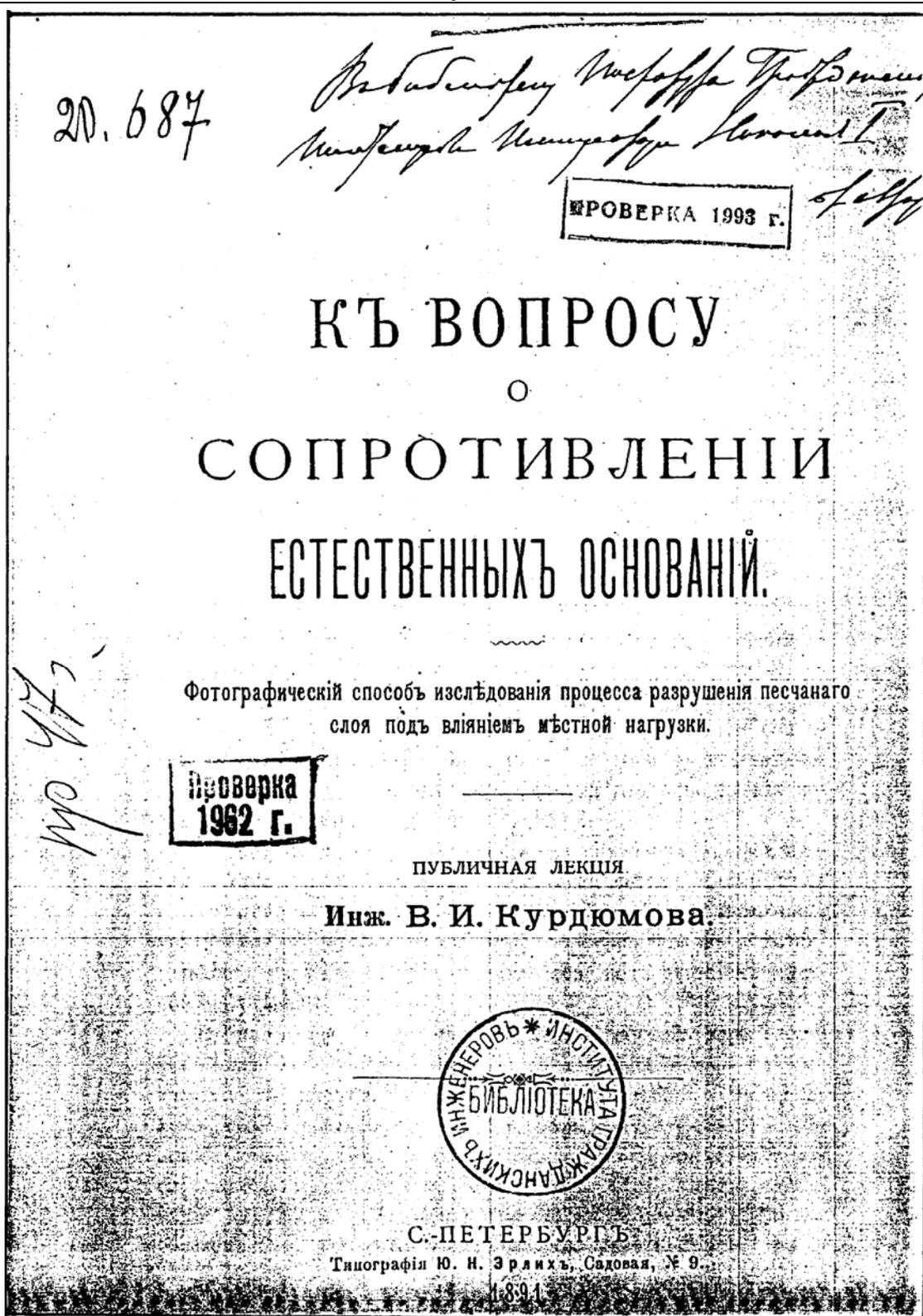


Рис. 1. Обложка с заглавием книги В. И. Курдюмова, 1891 г.

щей способности оснований и устойчивости возводимых на них сооружений. Исходя из работ Паукера, Янковского, Буссинеска, Шеффлера, Мора, Винклера и Ренкина Курдюмов искал вероятный вид кривой скольжения в момент разрушения грунта под влиянием местной нагрузки фундамента. Для этого он разработал новую теорию сыпучего грунта, рассматривая эллипсы напряжений в разных точках грунта. Таким образом. Курдюмов показал в 1889 г., что эллипсы напряжений в точках вдоль кривой скольжения меняют их наклон, т.е. направление наибольшего главного напряжения изменяется вдоль кривой скольжения.



Рис. 2. Профессор В.И. Курдюмов

Для вероятной формы кривой скольжения Курдюмов высказал следующую дефиницию (заметка: мы постарались изложить ее на современном русском языке):

«1. Линия скольжения должна рассматриваться как геометрическое место плоскостей скольжения эллипсов напряжений в различных точках сыпучего тела, причем отклонение этих эллипсов от их естественного положения во время покоя вызвано местной нагрузкой.

2. В виду необходимости допустить постепенное вращение эллипсов напряжений линия скольжения должна иметь плавную кривую, без точек перелома.

3. Кривая скольжения должна пересекать вертикальную ось фундамента под углом  $(45^\circ - \varphi/2)$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения. В нижней точке кривой скольжения наибольшее главное напряжение должно быть наклонено к горизонту под углом  $(45^\circ - \varphi/2)$ . Остальные эллипсы напряжений, лежащие по кривой скольжения, по мере приближения к поверхности грунтового слоя должны все более и более отклоняться от своего естественного положения».

На основе этих теоретических соображений и лабораторных экспериментов нагружения фундамента до разрушения грунта Курдюмов показал, что кривые скольжения имеют вид, показанный на рис. 3 и 4. Курдюмову, как и другим ученым его времени, не удалось найти аналитическое выражение этих кривых. Поэтому он решил найти истинный вид кривых скольжения экспериментальным образом, что ему удалось сделать с помощью непосредственного фотографирования призм выпирания грунта. Курдюмов исходил из следующих соображений: «если фотографировать в течение нескольких секунд песок, заключенный в сосуде со стеклянной стенкой и подвергаемый давлению стержня (т.е. фундамента), двигающимся непосредственно возле стенки сосуда, тогда песчинки, которые при этом остаются в покое, должны выйти на фотографии достаточно резко, отчетливо, тогда как изображения двигающихся песчинок должны быть смазанными. Совокупность смазанных изображений определит фигуру призмы выпирания, а граница между смазанными и резкими изображениями – кривую скольжения призмы выпирания грунта».

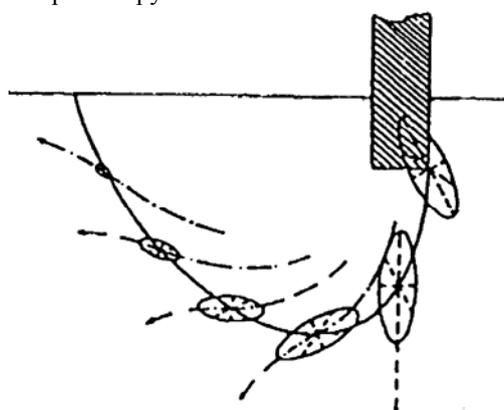


Рис. 3. Кривая скольжения и эллипсы напряжений одностороннего выпирания грунта

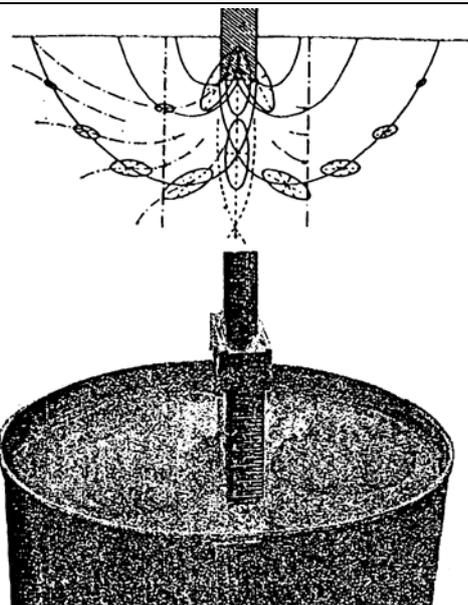


Рис. 4. Кривая скольжения, эллипсы напряжений и фотосъемка двухстороннего выпирания грунта

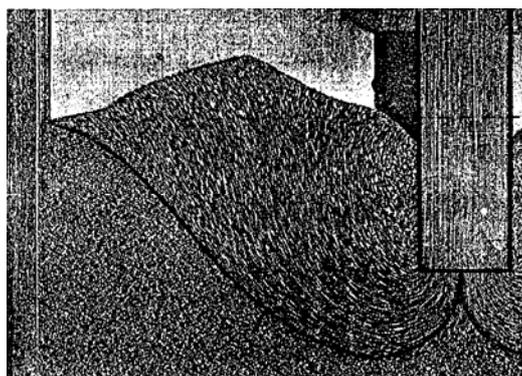


Рис. 5. Разрушение грунта при двухстороннем выпирании. Движение частиц грунта и кривые скольжения видны очень четко. Фотография Курдюмова №2

В начале февраля 1889 г. был изготовлен новый прибор со стеклянными стенками и проведены эксперименты по нагружению фундамента, положенного на песке с одновременным фотографированием движения песчаных частиц. На самой хорошей фотографии Курдюмова (рис. 5) очень четко видны движение грунтовых частиц и кривые скольжения в момент полного разрушения грунта под влиянием нагрузки опытного фундамента. Сравнивая современный высокий уровень фотографии с ее уровнем в 1889 г., мы должны восхититься мастерством русских инжене-

ров и техников девятнадцатого столетия, успевших доказать экспериментальным путем правильность их теоретических соображений.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОСЛЕ КУРДЮМОВА

После описанной работы Курдюмова долгое время публикаций о применении фотографического метода не было. Новые работы появились после 1920 г. Эти экспериментальные методы исследования предельной устойчивости оснований при помощи фотографического способа можно разделить на три группы. Рассмотрим их подробнее.

### 2. 1. Метод непосредственного фотографирования движения грунтовых частиц (метод Курдюмова).

В Германии в 1938 г. в знаменитой книге Кёглера и Шайдига «Строительные грунты и сооружения» [2] была опубликована фотография движения песчаных частиц под нагрузкой (рис. 5) (эксперимент был проведен в 1926 г. Шайдигом). Движение грунтовых частиц видно очень четко начиная с подошвы фундамента. Однако эта фотография была сделана до начала процесса разрушения грунта, т.е. в упругой части кривой «нагрузка – осадка».

В 1968 г. чешский специалист А. Мислевиц опубликовал в своем докладе на Европейской конференции по механике грунтов фотографию, которую он получил так же, как и Курдюмов в 1889 г. Однако Мислевиц нагружал одновременно два параллельных фундамента с целью исследовать влияние соседних фундаментов на предельную нагрузку грунта (см. [3], рис. 3 и 4).

### 2. 2. Метод цветных полосок

При этом методе фотографируются цветные полосы, уложенные у стекла лотка с грунтом. На фотографиях видны поверхности обрушения, по которым произошло скольжение призмы выпора, и упругое ядро под подошвой фундамента.

Одну из первых работ этого метода опубликовал Жан Керизель во Франции в 1939 г. [4].

В России опубликованы очень интересные результаты, полученные этим методом (Березанцев, 1950 г. [5], Евдокимов, 1956 г. [6] и Ничипорович/Хрусталева, 1957 г. [7]).

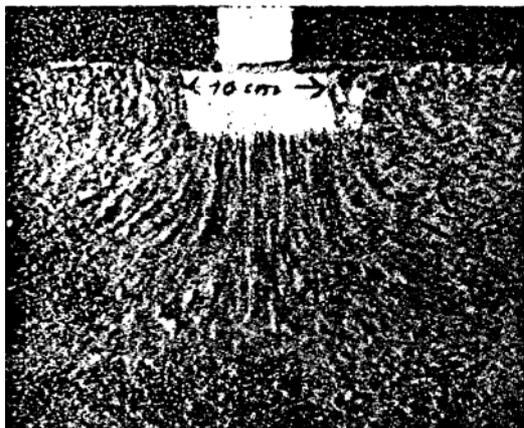


Рис. 6. Фотография движения песчаных частиц под нагрузкой (Kögler+Scheidig: «Baugrund und Bauwerk», Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1938) [2]

### 2. 3. Метод парафинированных листов

Этот метод, предложенный Ремизниковым в 1984 г. [8], очень интересен для лабораторной практики, так как позволяет определить не только направления, но и величины смещений различных точек основания. В грунтовой среде устанавливаются листы, покрытые тонким слоем парафина (посыпанного в случае исследования смещений глинистых оснований крупнозернистым песком). По мере возрастания нагрузки эти песчинки смещаются и царапают парафин, оставляя на нем следы, позволяющие определить направление и величину смещения в каждой точке основания. Получаемые кривые называют «линиями смещений» грунтовых частиц.

### 3. ЗНАЧЕНИЕ РАБОТ КУРДЮМОВА ДЛЯ РАЗВИТИЯ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ

Мы уже говорили, что Курдюмову, как и другим ученым его времени, не удалось найти аналитическое выражение для кривых скольжения призм выпирания грунта. Но ему удалось найти описанным экспериментальным путем истинный вид этих кривых. Таким образом, он создал фактический материал для

дальнейших исследований и определения несущей способности оснований. Поэтому работы Курдюмова являются большим вкладом для развития механики грунтов.

Автор данной статьи нашел в работах профессора Терцаги очень интересный пример, связывающий работы Курдюмова с механикой грунтов в Западной Европе двадцатого столетия. Основатель теоретической механики грунтов в Австрии профессор Венского университета Терцаги заметил в своей знаменитой книге «ERDBAUMECHANIK», что он знал работу Курдюмова, [1] и цитирует из нее тоже результаты Паукера и Янковского.

Работа Курдюмова [1] вышла в свет в 1891 г. в Санкт-Петербурге на русском языке. Год спустя немецкий студент E. v. Paton сделал ее перевод на немецкий язык и опубликовал его в сокращенном виде в 1892 г. в Лейпциге [10] (после долгих поисков мы нашли этот немецкий перевод в Вене).

В главе «Несущая способность оснований» профессор Терцаги заметил, что результаты Курдюмова способствовали выводу его формулы несущей способности оснований. Терцаги писал в своей «ERDBAUMECHANIK» дословно: «Автор выбрал фотографические картины движения грунта как основу для схемы действия местной нагрузки, так как они представляют собой единственные документы, которые дают нам объяснение о том, какие процессы протекают под влиянием местной нагрузки грунта».

Эти слова Терцаги свидетельствуют о большом значении трудов Курдюмова для развития механики грунтов и заключают в себе глубокий смысл, который еще более актуален сегодня, в наше компьютерное время: *Самая важная задача инженера -- понимать физические процессы, а не «только нажимать компьютерные кнопки»!*

Курдюмов цитировал в [1] мнение профессора Бусинеска, «что интегрирование дифференциальных уравнений равновесия сыпучих тел едва ли возможно». Их наилучшие решения нашли в двадцатом столетии известные русские ученые Голошкевич, Соколовский, Малышев и др. [11–14]

Но Курдюмов был первым, кто выяснил экспериментально природу процесса разруше-

ния грунта под фундаментом и движения грунтовых частиц по кривым скольжения (см. рис. 3, 4 и 5).

Наконец, можно утверждать, что значение Курдюмова для развития механики грунтов равносильно значению Фарадея для развития физики: *математическая теория электромагнетизма Максвелла 1885 г. основана на опытах Фарадея 1832 г. с линиями магнитного поля* [15, 16].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор выражает искреннюю благодарность всем коллегам за их помощь: профессору А. Б. Фадееву, который достал мне копии книг [1] Курдюмова, профессору В. М. Улицкому за любезное приглашение принять участие в юбилейной конференции, посвященной 300-летию Санкт-Петербурга, профессору Н. Brandl и его институту механике грунтов Венского технического университета за предоставление копия немецкого издания (1892 г.) работы Курдюмова, д-ру М. Б. Лисюку, д-ру А. Г. Шашкину, д-ру К. Г. Шашкину, НПФ «Геореконструкция» (Санкт-Петербург) и инженеру Н. Г. Бобылеву (Санкт-Петербург), который помогает мне найти русские книги по истории математики и по механике грунтов.

*Карлсруэ, 21 марта 2003*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов В.И. К вопросу о сопротивлении оснований. Фотографический способ исследования процесса разрушения песчаного слоя под влиянием

местной нагрузки. Вторая публичная лекция 11 декабря 1889 г. Санкт-Петербург, 1891.

2. Kögler F., Scheidig A. Baugrund und Bauwerk. Berlin, 1938) (2. Auflage: 1948, Seite 75, Abb. 62).

3. Myslivec A. Einfluß der benachbarten Streifenfundamente auf Ihre Tragfähigkeit. Vorträge der Donau-Europäischen Konferenz, Wien (1968), Seite 42–49.

4. Kérisel J. La force portante des pieux. Ann Ponts Chauss. 109 (1939) Nr.21, 579–633.

5. Березанцев В. Г. Некоторые задачи теории предельного сопротивления грунтов нагрузке: Дисс. канд. техн. наук / ЛИСИ, Л., 1950.

6. Евдокимов П. Д. Прочность оснований и устойчивость гидротехнических сооружений на мягких грунтах. М.: Госэнергоиздат, 1936.

7. Ничипорович А. А. Устойчивость бетонных водоподпорных сооружений на нескальных грунтах. М.: Госстройиздат, 1937.

8. Ресизников В. К. Новый метод исследования деформаций грунтов и некоторые его практические применения // Изв. ВНИИГ, Т. 36, 1948.

9. Tezzaghi K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Leipzig + Wien, 1925.

10. Kurdümmoff W. I. Zur Frage des Widerstandes der Gründungen auf natürlichem Boden. Der Zivilingenieur. 1982, p. 292.

11. Голушкевич С. С. Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды. М.: Гостехиздат, 1948.

12. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс. М.: Гостехтеориздат, 1957.

13. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Изд. АН СССР, 1942; М.: Гостехтеориздат, 1954.

14. Малышев М. В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М.: Стройиздат, 1994.

15. Brugg M. On Giants' Shoulders. London, 1998.

16. Стройк Д. Я. Краткий очерк истории математики. М.: Наука, 1990 (см. стр.215).