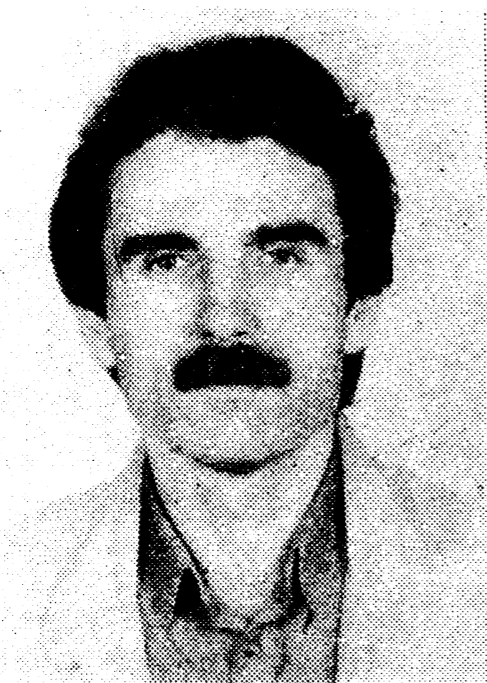


УДК 624.131.542

С. А. ЕЛИЗАРОВ, канд. техн. наук (Балаковский филиал СПИ);
М. В. МАЛЫШЕВ, д-р техн. наук, проф. (МИСИ)

КРИТЕРИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И РАЗЛИЧНЫЕ ФАЗЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЯ

Описываются результаты экспериментов в остекленном отсеке для определения деформированного состояния песчаного основания жесткого полосового шероховатого штампа при постепенном его загрузке вплоть до исчерпания несущей способности. Изложена методика фиксации деформаций с помощью последовательного фотографирования и устройства необходимой для этого «шахматной» черно-белой сетки. Показано, что разрушение в основании даже при предельной нагрузке имеет локальный характер.



**ЕЛИЗАРОВ
СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

Кандидат технических наук, научный сотрудник филиала Саратовского политехнического института. Основное направление научной деятельности — прогнозирование надежности конструкций зданий и сооружений атомных станций.



**МАЛЫШЕВ
МИХАИЛ ВАДИМОВИЧ**

Доктор технических наук, профессор МИСИ им. В. В. Куйбышева, заслуженный деятель науки и техники РФ, вице-президент Российского национального комитета по механике грунтов и фундаментостроению, почетный доктор Будапештского технического университета, член редколлегии польского журнала «Архивум гидротехники».

Основные направления научной деятельности — прочность грунтов, устойчивость оснований, теория предельного равновесия сыпучей среды. Автор более 150 опубликованных работ.

Критерием исчерпания несущей способности оснований обычно считается полное развитие областей с предельным состоянием, приводящее к прогрессирующим (провальным) осадкам фундамента и выпиранию грунта на поверхность [1]. Целью настоящего исследования являлся анализ результатов проведенных нами опытов по установлению деформируемости однородного песчаного основания, а также очертаний областей с предельным состоянием в основании жесткого полосового штампа при различной увеличивающейся вплоть до максимального значения нагрузке.

Исследования песчаного основания проводились в поворотном относительно продольной оси лотке размерами 100×40×60 см с прозрачными боковыми стенками и штампом 40×10 см. Во всех опытах реализовывались условия плоской деформации грунта, а благодаря использованию специальных направляющих обеспечивалось двустороннее выпирание. Основание формировалось из послойно уплотнявшегося виброштампом воздушно-сухого песчаного грунта средней крупности при плотности 1,71...1,73 г/см³, что соответствовало коэффициенту пористости 0,55 и 0,53. Угол внутреннего трения песка φ, определённый в стабили-

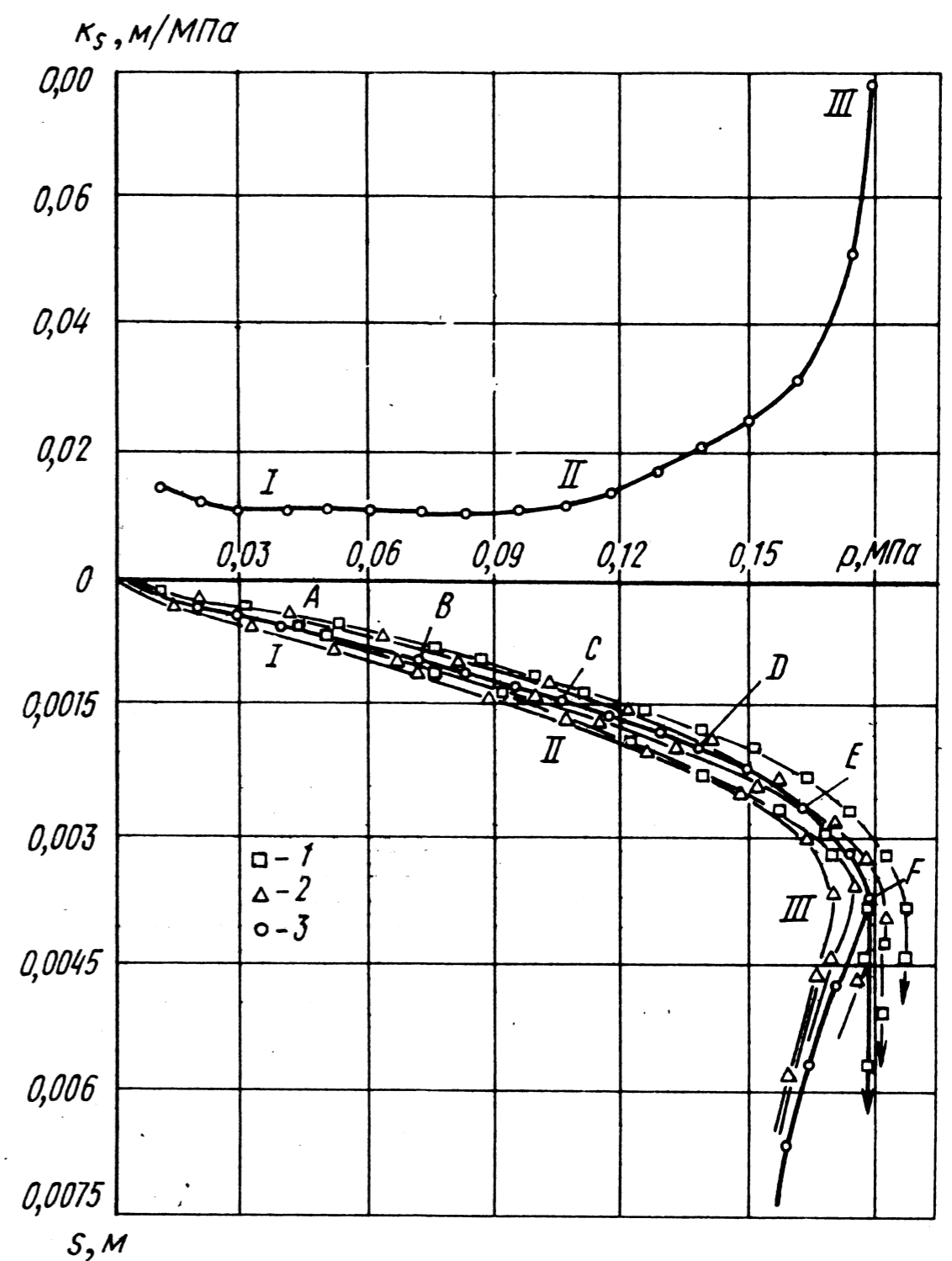
метре, где реализуются условия плоского деформирования, а образец имеет призматическую форму, составляя $44,5^\circ$ при пиковой прочности, а при осесимметричном деформировании для того же песка — 40° . Нагружение штампа производилось по силовой схеме (статическое нагружение) и по схеме задаваемых перемещений (кинематическое нагружение). Использование кинематического нагружения позволило предотвратить провальные осадки штампа, характерные для статического нагружения, и оценить деформированное состояние основания при предельной нагрузке.

Для наблюдения за картиной деформирования основания на его боковой поверхности наносился фон в виде «шахматной окраски» квадратами со стороной 1 см. Технология нанесения этой окраски заключалась в том, что сначала набрызгивалась черная тушь, а затем накладывался шаблон в виде листа плотной бумаги с вырезанными в нем квадратами — отверстиями, расположенными один от другого на расстоянии 1 см. Через шаблон производилось напыление тонким слоем порошка мела, после чего шаблон перемещался на одну клетку вверх и в сторону, а затем операция напыления повторялась и т. д. После снятия шаблона на поверхности основания оставалась окраска в виде «шахматной доски». В процессе деформирования основания на различных этапах нагружения производилась последовательная фотосъемка боковой поверхности, что позволило по искажениям квадратов «шахматной окраски» проследить за деформированием грунта, установить трансформацию формы уплотненного ядра и его очертание. Это делалось путём наложения фотонегативов начального и любого последующего друг на друга. Таким же образом удалось очертить траектории перемещений частиц грунта. В целом процесс деформирования основания удалось наглядно проследить также и с помощью кино съемки, причём в съёмочный кадр включались индикаторы, регистрирующие осадку штампа, и динамометр, фиксирующий прикладываемую к штампу нагрузку. Последнее позволило зарегистрировать момент исчерпания несущей способности основания.

Количественная оценка деформирования грунта производилась по перемещениям поверхностных марок, уложенных в углы квадратов «шахматной окраски» в период подготовки к испытаниям.

Рис. 1. Графики зависимостей $s(p)$ — внизу и $K_s(p)$ — сверху

1 — при статическом нагружении; 2 — при нагружении по схеме задаваемых перемещений; 3 — осредненная зависимость



Обработка велась на координатно-измерительном приборе с точностью 0,005 мм. По этим данным вычислялись относительные деформации элементов грунта, по которым затем устанавливалось очертание областей с предельным состоянием. Для оценки предельного состояния в точках массива вводился параметр $\eta = \epsilon_i^o / \epsilon_i^f$, где ϵ_i^f — интенсивность деформаций сдвига, определённая из стабилометрических испытаний в условиях плоской деформации при достижении пиковой прочности, а ϵ_i^o — интенсивность деформаций сдвига элементов грунта, выделенных на боковой поверхности основания в форме квадратов, определённая по перемещениям марок. При этом считалось, что в областях основания, где $\eta \geq 1$ грунт находится в предельном состоянии с дальнейшим разупрочнением [2]. При обработке результатов испытаний в стабилометре и в лотке они корректировались с учётом трения по стенкам. Испытания в лотке позволили установить зависимость осадок штампа от действующих на него нагрузок (рис. 1). При статическом нагружении и кинематическом нагружении эти зависимости вплоть до потери основанием устойчивости различаются мало, а при потере устойчивости в первом случае наблюдались провальные осадки, в то время как при втором типе нагружения с ростом осадки реактивное сопротивление основания

снижалось. Таким образом, применение статической схемы нагружения оправдано при проведении испытаний для нагрузок, не достигающих предельных и околопредельных значений. Установлено также, что при испытаниях песчаных оснований скорость нагружения практически мало сказывалась на результатах опытов, а предельная нагрузка различалась лишь в пределах точности опытов, о чём указывалось и ранее [3].

Из рис. 1 можно установить характерные точки. Воспользуемся для этого удобной интерпретацией полученных кривых с помощью коэффициента $K_s = ds/dp$, показывающего интенсивность нарастания осадки с увеличением нагрузки. На первых этапах нарастания нагрузки наблюдалось уплотнение песка основания (до точки I). Далее по мере роста нагрузки при $p = (0,15 - 0,20)p_{пр}$, где $p_{пр}$ — предельное значение нагрузки, величина K_s стабилизировалась вплоть до $p = (0,6 - 0,7)p_{пр}$, т. е. до точки II, поэтому график K_s соответствовал горизонтальному участку. При дальнейшем нагружении график после точки II уже стал отличаться от прямолинейного, величина K_s стала увеличиваться. Наибольшая интенсивность нарастания осадки проявилась при подходе к точке III, соответствующей предельной нагрузке на основание. Дальнейшее деформирование после точки

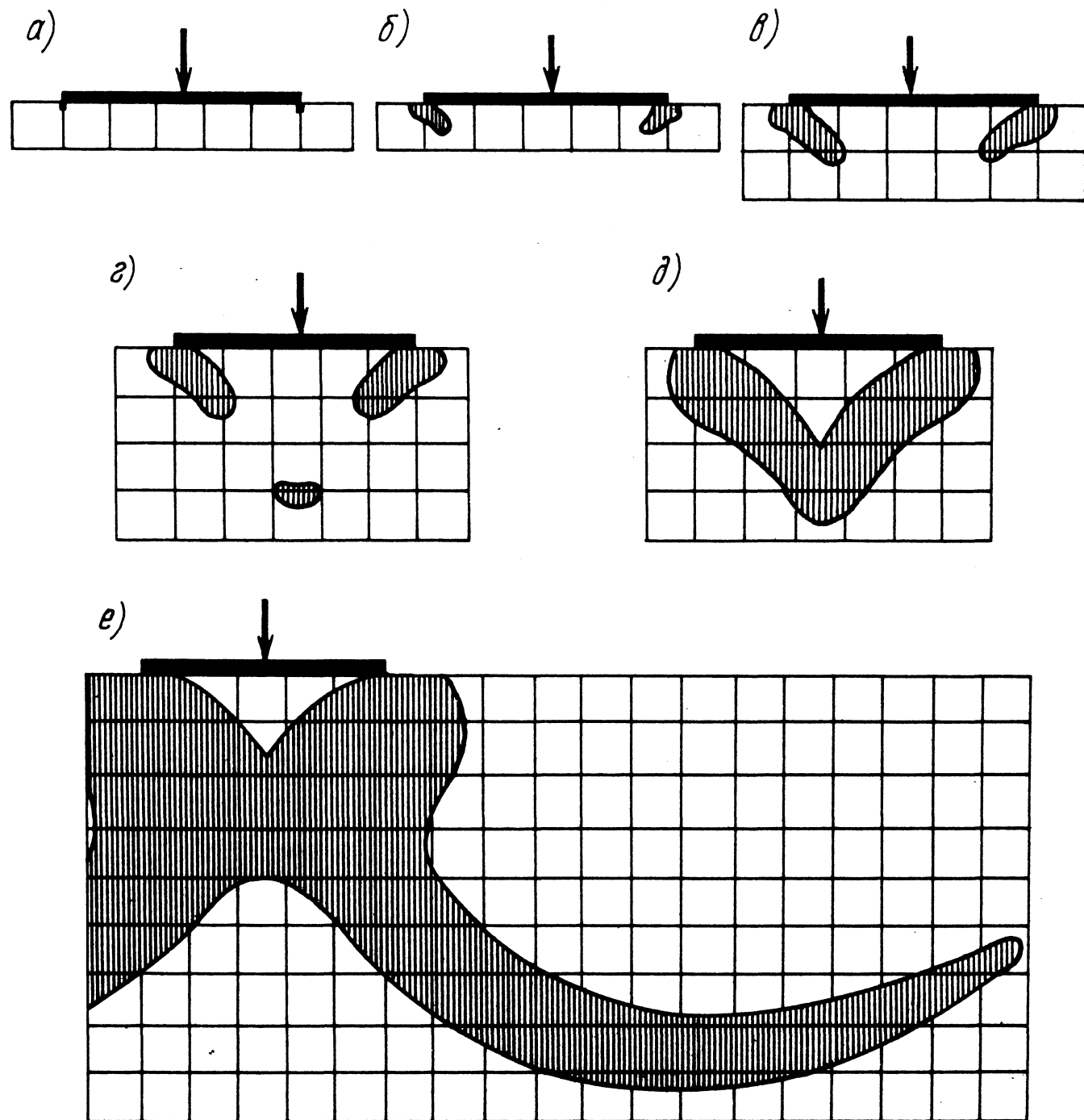


Рис. 2. Очертания областей предельного состояния грунта в основании жесткого полосового штампа при нагрузке p , равной

а — $0,15 p_{пр}$; б — $0,3 p_{пр}$; в — $0,5 p_{пр}$; г — $0,7 p_{пр}$; д — $0,85 p_{пр}$; е — $p_{пр}$

III соответствовало уменьшению реактивного сопротивления основания, что объясняется разупрочнением грунта после истощения несущей способности. Общий выпор грунта на поверхности основания наблюдался при дальнейшем деформировании и достижении осадкой величины, в несколько раз превышающей соответствующую нагрузке $p_{пр}$. В связи с этим на графике $s(p)$ можно при вдавлировании жёсткого шероховатого штампа в песчаное основание по схеме задания перемещений наметить следующие фазы деформирования, характеризующиеся: 1) уплотнением грунта; 2) линейной деформируемостью; 3) нелинейной деформируемостью; 4) разупрочнением; 5) общим выпором.

Рассмотрим процесс возникновения и развития в основании областей с предельным состоянием в соответствии с пятью фазами деформирования. На рис. 2 представлены очертания областей предельного состояния грунта, соответствующие точкам А, В, С, D, E, F (см. рис. 1). На этапе нагружения А при $p=0,15p_{пр}$, соответствующем окончанию фазы уплотнения, области с предельным состоянием отсутствуют. Зарождение их под краями штампа происходит при переходе основания во вторую фазу нагружения до В при

$p=0,3p_{пр}$. При дальнейшем увеличении нагрузки области с предельным состоянием развиваются вглубь основания по направлению к оси симметрии штампа в виде узких полос. Несмотря на наличие областей предельного состояния на этапе нагружения до С, когда $p=0,5p_{пр}$, зависимость между осадкой и нагрузкой сохраняется линейной. На этапе нагружения до D при $p=0,7p_{пр}$, помимо расширения областей предельного состояния, развивающихся из-под краёв штампа, наблюдалось возникновение новой области под центром штампа на глубине около $0,6b$ (где b — ширина штампа). Причиной зарождения этой изолированной области является наличие под штампом уплотнённого ядра, у вершины которого происходит локальное разрушение [2]. Наличие ядра зафиксировано с помощью наложения фотонегативов начальной О и соответствующей точке D состояний. Ширина ядра составляет примерно $0,9b$. Момент, когда уплотнённое ядро под штампом сформировалось, логично принять за начало третьей фазы деформирования, характеризующееся переходом к нелинейной зависимости $s(p)$. По мере дальнейшего нагружения штампа сформировавшееся уплотнённое ядро внедряется в основание, вследствие

чего разрушение грунта происходит вдоль всей поверхности ядра. После этого на этапе нагружения E при $p=0,85p_{пр}$ области с предельным состоянием, развивающиеся из-под краёв штампа и на глубине, сливаются, очерчивая как упругую часть уплотнённого ядра, находящуюся непосредственно под штампом, так и пластическую, примыкающую снизу к упругой [4]. На этапе нагружения F основание теряет устойчивость, причём в этом случае упругая часть ядра сохраняет форму треугольника с вогнутыми сторонами и несколько уменьшенной высотой, а пластическая часть наоборот растёт. Области с предельным состоянием расширяются не только вблизи ядра, но и развиваются в виде узких полос — «язычков» в стороны и вглубь основания.

Таким образом, во всём рассмотренном диапазоне нагрузок области с предельным состоянием носят явно локальный характер и даже в момент истощения несущей способности основанием они не выходят на поверхность, как бы «застревая» внутри грунтового массива (см. рис. 2) на глубине (1,1...1,2) b от поверхности и на расстоянии (2,2...2,3) b от края штампа, а общего выпора грунта на поверхность не наблюдается. С этого момента начинается четвёртая фаза деформирования, связанная с увеличением осадки при уменьшающейся нагрузке и разупрочнением грунта. При дальнейшем деформировании области предельного состояния достигают дневной поверхности и начинается пятая фаза непосредственного выпирания, причём здесь наблюдалось смещение части массива как единого целого, поскольку внутри призмы выпора «шахматная окраска» оставалась практически неискажённой.

Выводы

1. Во всём диапазоне нагрузок и даже в момент истощения несущей способности основания в областях, находящихся непосредственно под штампом, а также в призме выпирания, грунт может не достигать предельного состояния по прочности, что свидетельствует о локальном характере его разрушения в основании.

2. В процессе нагружения по мере развития областей предельного состояния в различных точках основания грунт будет иметь разные значения прочностных характеристик, зависящие от накоп-

ленной деформации сдвига ϵ_i . В областях предельного состояния, где деформации сдвига малы, угол φ имеет значение, близкое к пиковому. В областях, где наблюдаются значительные деформации и происходит разрушение грунта, сопротивление сдвигу будет падать, достигая остаточного значения φ . Указанные особенности должны быть отражены в расчетных схе-

мах и способах, используемых для определения несущей способности оснований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березанцев В. Г.** Расчет оснований сооружений.— Л.: Стройиздат, 1970.— 208 с.
2. Локализация деформаций и разрушение песчаного грунта в основании полосового штампа / **С. А. Елизаров, В. С. Копейкин, В. М. Демкин, А. С. Саенков** // Межвузов. сборник.— Йошкар-Ола, 1989.— С. 50—54.
3. **Гольдштейн М. Н., Кушнер С. Г., Шевченко М. И.** Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений.— Киев: Будівельник, 1977.— 208 с.
4. **Горбунов-Посадов М. И.** Устойчивость фундаментов на песчаном основании.— М.: Госстройиздат, 1962.— 96 с.