

О ЛАВИНООБРАЗНОМ РАЗРУШЕНИИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

Ю.А. Ивашенко, Е.Н. Серебренникова, А.Ж. Урумбаев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Надежность и работоспособность несущих строительных конструкций является перво-степенной задачей при проектировании зданий и сооружений. Важным фактором работы каркаса является грунтовое основание и фундаменты. Однако в строительной практике имеют место быть случаи образования пустот в массиве грунта посредством вымывания, разуплотнения грунта. Рассмотрены существующие теории работы тел при локальных повреждениях, однако исследований в этом направлении в отношении грунтового основания обнаружено не было. Описывается план исследований для выявления зависимостей осадки фундамента от действия внешней нагрузки с учетом локальных повреждений грунта, выявление критических размеров локальных повреждений, при достижении которых начинается лавиноподобное разрушение массива грунта.

Ключевые слова: локальные повреждения, грунтовое основание, лавиноподобное разрушение, напряжения в грунте, осадки фундамента, критические повреждения.

Обзор литературы по повреждениям зданий и сооружений в результате осадок грунтового основания

В практике эксплуатации зданий и сооружений различного назначения наблюдались многочисленные случаи повреждений конструктивных систем, вызванных осадочными деформациями грунтовых оснований [1–6].

Отмечаются просадки, связанные с изменением свойств грунта под влиянием замачивания, изменения гидрогеологических условий и техногенных воздействий.

Отмечается влияние на процесс накопления повреждений в конструкциях особенностей конструктивных систем зданий и сооружений [7–10].

Кроме того, отмечается влияние степени использования несущей способности грунтов основания, неравномерности давления [6, 7, 9, 11], а также изменение его температурно-влажностного режима.

В [1] приводятся примеры повреждений и чрезмерных осадок, связанные с нарушением гидрогеологического режима [8] и наличием просадочных грунтов [9].

В практике эксплуатации зданий и сооружений наблюдались случаи их повреждений вследствие локального снижения несущей способности грунтового основания [9, 10, 12, 13].

Приводятся случаи вымывания грунтового основания вследствие аварий на теплотрассе и водоотводах под жилыми зданиями.

Влияние замачивания грунтового основания устанавливалось проведением эксперимента по искусственному увлажнению основания, что приводило к локальным повреждениям конструкций [14].

Приводятся случаи, когда после постройки комплекса из трех 10-этажных зданий (Польша, 1964–1965 гг.) из монолитного бетона наблюдались отклонения от вертикали [15]. Поэтому при наличии локальных повреждений грунтового основания возможны появления недопустимых кренов. В связи с этим можно указать на данные [16], в которых описываются крены двух 5-этажных зданий, а в 1960-х годах в Рио-де-Жанейро наблюдалось опрокидывание (с большим креном) 11-этажного жилого дома [8, 16].

В действующих нормативных документах [17] указывается на необходимость учета влажности в процессе строительства зданий и их эксплуатации при определении характеристик сопротивления грунта и определении осадок. В настоящее время фиксируется глобальное потепление и можно ожидать подъема уровня грунтовых вод, изменения водного режима грунтового основания. В связи с этим повышается опасность подтопления территорий и образования локальных повреждений грунтового основания под существующими зданиями и сооружениями. В [18] обсуждается вопрос об учете реологических процессов в грунтах при прогнозе осадок во времени. Предлагается использование теорий фильтрации и ползучести. Учет явлений фильтрации и ползучести в грунтах может более точно прогнозировать изменение напряженного состояния грунтового основания и рост осадок при рассмотрении вопроса о наличии локальных повреждений грунтового массива в зоне влияния фундаментов.

В [19, 20] рассмотрен вопрос об учете трения между подошвой фундамента и грунтовым основанием. Трение влияет на распределение давлений

по подошве [20]. Локальные повреждения грунтового основания могут изменить распределение давлений под подошвой фундамента, так как создаются зоны концентрации напряжений.

Послепостроечные изменения свойств грунтового основания эксплуатируемых зданий отмечались в статьях [7, 21].

Неравномерное распределение температуры вызывало передвижение влаги под зданием [22]. Вследствие неоднородности грунтового основания наблюдались осадки в 5–6 раз больше допустимых [9]. Отмечается [1] вымывание грунта в результате прорыва теплотрассы (г. Подольск: 9-этажный кирпичный дом; г. Челябинск: Театр юного зрителя). В книге [1] отмечается также вымывание грунта в результате неправильно выполненного водоотлива.

Отмечались повреждения зданий в результате неравномерных осадок [10, 12], появившихся в результате дефектов грунтового основания.

Замачивание оснований фундаментов отмечается в результате неисправных водоотводящих сетей [23].

Опыт эксплуатации зданий и сооружений показал, что необходимы исследования и теоретические разработки.

Разрабатываются методы полного вероятностного расчета строительных систем «основание – сооружение» [24]. Введен термин «критическое сечение», а его надежность оценивается превышением несущей способности над внешним воздействием. Принят ряд допущений, включая грунтовое основание: «Реакция грунта под подошвой фундамента является внутренним усилием, пропорциональным внешнему воздействию и имеющим такую же изменчивость, как и внешнее воздействие» (постоянство коэффициента вариации). Основание смоделировано по Винклеру. Использован метод Монте-Карло при 100 статических испытаниях. Сделан следующий вывод: случайные свойства основания влияют на значение внутренних усилий системы «основание – сооружение».

Вопрос о влиянии локального повреждения грунтового основания с учетом статистической изменчивости не рассматривался.

Рассматривается вопрос [25] о сопротивлении конструктивной системы, известный в теории надежности под термином «живучесть» (выключение отдельных элементов системы в связи с их повреждением). Предложены алгоритмы расчета, основанные на энергетическом подходе. Сделаны выводы о том, что живучестью можно управлять, меняя параметры систем, и проводить анализ влияния каждого элемента на живучесть. Вопрос о внезапно поврежденных элементах фундаментов и оснований не рассматривался.

В статье [26] на основе предположений [27] сделан анализ остаточного ресурса резервуара, имеющего повреждение. Сделан вывод о том, что разработанная методика может быть использована

на стадии проектирования, усиления и восстановления конструкций.

Вопрос о взаимодействии резервуара с основанием в случае появления в нем локальных повреждений не рассматривался.

С учетом норм [28], требующих варьирования свойств грунтового основания при особых воздействиях (сейсмических), в работе [29] показано, что в системе «сооружение – основание» с применением платформенной модели в некоторых случаях (в зависимости от жесткости штампа) количество расчетов можно сократить. Предлагаемые формулы рекомендованы для сложных грунтовых условий (например, нарушение горизонтальной слоистости). Вопрос об образовании локальных повреждений в основании не рассматривался.

Подтверждается актуальность вопроса безопасности конструкций при аварийных воздействиях [30] и обращается внимание на то, что документы РФ практически не содержат требований расчета на лавинообразное разрушение. Делается вывод о том, что рекомендаций, составленных для г. Москвы, недостаточно [31, 32], а также указывается на необходимость разработки обоснованных, простых и понятных методов проектирования и расчета, способных предотвратить потенциальную опасность лавинообразного обрушения строительных объектов. Продолжение исследований в этом направлении отражено в статьях [33, 34].

В статье [33] расчет системы «основание – сооружение» в виде штампа на ограниченном пространстве выполнялся с применением вариационных методов и статико-динамических моделей взаимодействия. Делается вывод о необходимости дальнейших поисков рационального и уточненного моделирования, разработок новых альтернативных моделей взаимодействия сооружений с основанием при различных воздействиях, а также о целесообразности проверок новых моделей экспериментальным путем.

В работе [34] предлагается создание экспертной системы (ЭС) оптимального проектирования и проведение ряда расчетов, включая расчет с удалением некоторых элементов системы. Задача учета локальных повреждений основания не рассматривается.

В статье [35] отмечается, что существующие расчеты основаны на исключении отдельных несущих элементов. Подтверждается актуальность направления исследований и необходимость разработки «обоснованных и понятных рекомендаций, способных предотвратить потенциальную опасность лавинообразного разрушения».

В статье [36] подчеркивается необходимость исследований влияния локальных повреждений на лавинообразное разрушение.

В законе № 384-ФЗ от 30 декабря 2009 г. такое требование сформулировано. Следовательно, исследования и разработки в этом направлении с учетом повреждений грунтового основания являются актуальными.

Предварительные выводы:

1. Практика строительства и эксплуатации зданий и сооружений показывает, что их повреждение и аварии происходят во многих случаях вследствие неравномерных осадок и их превышения над предельными величинами. Причинами являются природные явления и техногенные воздействия, которые приводят к локальным изменениям свойств грунта и его вымывания в отдельных зонах.

2. Изменение водного режима с учетом изменений распределения температурных полей грунтового основания приобретает актуальность, если учесть прогнозы климатических изменений в будущем.

3. Используются следующие обозначения и термины:

- ЛП (локальное повреждение) элемента системы «основание – конструкции»;
- ЭС (элемент системы) для основания (ЭСО) – зона, в которой существенно снижаются геометрические и физико-механические характеристики грунта, включая образование полостей и пустот; для конструкции то же самое, включая случай полного разрушения (выключение);
- ЛР (локальное разрушение) – процесс развития повреждения; для основания это увеличение геометрических и снижение физико-механических характеристик; для конструкций – это снижение геометрических и физико-механических характеристик. Существование двух стадий развития ЛР: ЛРУ – устойчивое развитие; ЛРЛ – лавинообразное разрушение. Для основания ЛРУ – развитие, не приводящее к разному увеличению скорости; ЛРЛ – развитие, приводящее к разному увеличению скорости (критическое состояние, при котором характеристики (параметры) ЭС принимают значения «критических»).

**Понятие лавинообразного разрушения
грунтового основания**

Термин «лавинообразное разрушение (ЛР)» применительно к конструктивной системе использован в Законе № 384-ФЗ (от 30.12.2009) в связи с требованием расчета на техногенное воздействие [37].

В этом случае ЛР предполагает появление «зоны разрушения», которая характеризовалась определенными размерами, названными «критическими (КЗР)» [38].

Понятие о ЛР, по-видимому, можно отнести к исследованиям А. Гриффитса [3, 4], в которых при анализе разрушения материалов было принято существование начальных дефектов в виде полос (трещин). Предполагалось, что с ростом нагрузки происходит увеличение размеров полостей без полного разрушения материала. При определенных размерах, названных «критическими», происходит саморазвитие полости, приводящее к

разделению материала на части (лавинообразное разрушение).

Эксперименты над различными материалами подтвердили данное предположение [38, 39]. Аналогичные результаты были получены при испытаниях бетона на одно- и двухосное сжатие с появлением нисходящего участка диаграмм «напряжение – деформация» [40].

Относительно конструктивных систем имеются документы, рекомендуемые к применению без использования понятия «критического размера зоны локального разрушения»:

1) МДС 20-2.2008. «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях».

2) «Рекомендации по защите тяжелых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях». Москомархитектура, 2002 г.

3) «Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения». Москомархитектура, 2006 г.

Рекомендованы схемы гипотетически возможных локальных разрушений (колонна, перекрытие). Наиболее опасные: угловые колонны, средние по периметру, в местах выступов перекрытий.

Отмечаются также документы, устанавливающие необходимость расчетов на лавинообразное разрушение при локальных повреждениях [34, 35]: МГСН 4.19-05; СП 52-103-2007.

На научной сессии (проведенной 14.04.09 МООПК совместно с Советом РААСН по пространственным конструкциям) указано:

- уточнить расчет схемы фундаментов и оснований;
- использовать понятия локального разрушения, лавинообразного обрушения, живучести, учета истории нагружения объекта и грунтового основания, неупругое деформирование и уплотнение грунтов при осадках зданий.

Формирование сущности понятия «лавинообразное разрушение грунтового основания» (ЛРГО) осуществлено с учетом следующих соображений:

- учесть сущность понятия лавинообразного (прогрессирующего) разрушения для материалов и конструкций (ЛР);
- учесть особенности сопротивления грунтового основания.

Сущность ЛР состоит в том, что выявляется «критический размер локального повреждения».

Особенность сопротивления грунтового основания состоит в том, что основным показателем его несущей способности является предельная величина осадки и степень ее неравномерности.

В теории [1–3] предельного равновесия предполагается, что предельное состояние достигается в любой точке грунтового массива, то есть прини-

мается наихудшая ситуация. В действительности (как показывают опыты по измерению давления) предельное состояние достигается не во всех точках массива. Возникают локальные зоны, где достигается предельное состояние, но общего нарушения устойчивости не наблюдается. Общая потеря устойчивости основания произойдет, если зона локального разрушения примет определенные размеры.

Следовательно, для грунтового основания необходимо вводить понятие «критического размера локального повреждения грунтового основания».

На рис. 1 сопоставлены зависимости $S = f(p)$ «основание – осадка»:

линия (1) – зависимость при отсутствии локальных повреждений;

линия (2) – зависимость при появлении локальных повреждений и отсутствии лавинного разрушения;

линия (3) – зависимость $S = f(p)$, на которой фиксируется точка, при которой существенно меняется скорость нарастания осадок ds/dp .

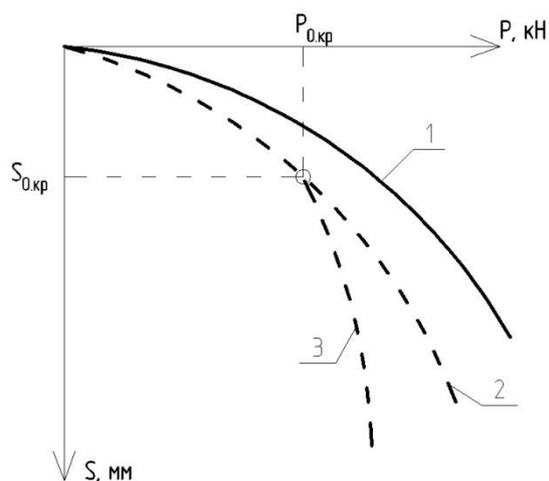


Рис. 1. Зависимость осадки фундамента от давления на грунтовое основание

Эта точка соответствует определенному размеру зоны повреждения грунтового основания. Размер зоны трактуется как «критический», а ему соответствуют значения $S_{0,кр}$ и $P_{0,кр}$. Эти значения однозначно связаны, если не учитывать начальную неоднородность грунтового основания.

При учете неоднородности (статистическая изменчивость механических свойств) величины $S_{0,кр}$ и $P_{0,кр}$ определяются с определенной вероятностью. Существующее состояние теории вероятности позволяет это осуществить [41–44].

Применение вероятностных методов может обеспечить надежность системы «сооружение – грунтовое основание» при наличии локальных повреждений основания и развития в нем «лавинообразного разрушения».

Теоретическое определение критического размера локального повреждения грунтового основания

Устанавливается общая схема взаимодействия фундамента с грунтовым основанием при появлении в нем локального повреждения, на основании которой определяется критическая величина локального повреждения, вызывающая лавинообразное разрушение.

Задача была поставлена впервые А. Гриффитсом (1924 г.) [45] применительно к металлам и явилась основой развития механики твердого тела как «механика хрупкого разрушения». В дальнейшем развитии появились термины «коэффициент интенсивности напряжения» и направление «механика упругопластического разрушения». Созданы методы экспериментального определения параметров. Выявлено влияние различных факторов. Разработаны методы практического применения [39].

Такая задача должна решаться для грунтового основания, так как часто встречающийся на практике случай образования пустот или зон с пониженными характеристиками грунта приводил к серьезным повреждениям конструкций, включая фундаменты, а иногда к авариям.

Применим энергетический подход, разработанный А. Гриффитсом. При появлении повреждения в виде трещины некоторой формы появляется зона разгруженного материала (А. Гриффитс предполагал эту зону в форме эллипса). Можно предположить, что форма зоны разгрузки может быть разной в зависимости от формы трещины и физико-механических характеристик рассматриваемого тела. Для установления общей закономерности это не является принципиальным утверждением. По теории А. Гриффитса освобожденная энергия в зоне разгрузки затрачивается на поверхностную энергию в трещине (баланс энергий).

Предположение А. Гриффитса можно использовать для грунтового массива с локальным повреждением, не используя его форму трещин и форму зоны разгрузки.

Предположим, что грунтовый массив определяется размерами L – ширина, h – высота. Локальное повреждение в виде горизонтальной полости имеет размер l_t . Необходимо определить критический размер l_t , вызывающий лавинообразное разрушение (рис. 2).

Составляется уравнение баланса энергий.

Величина выделенной энергии из зоны разгрузки:

$$Y = \frac{P^2}{2E} \cdot 2\pi l_t^2.$$

Затрата энергии на разрушение зон концентрации напряжений локального повреждения: $A = l_t \cdot \beta$, где β – коэффициент пропорциональности (при $l_t = 0$ – концентрация в зоне отсутствует, при увеличении l_t – концентрация возрастает).

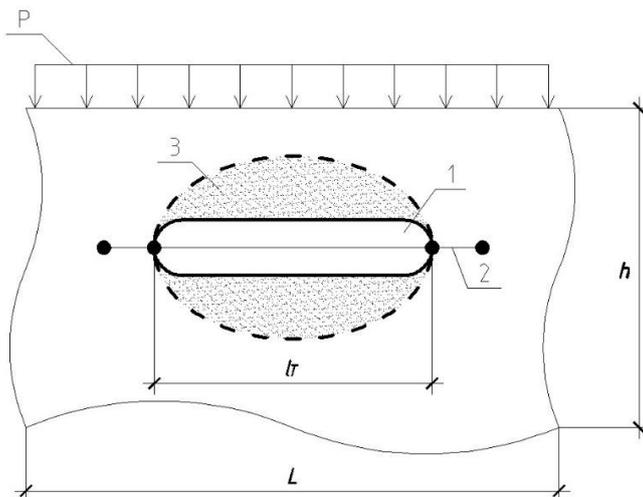


Рис. 2. Схема к определению $l_{t\text{кр}}$: 1 – локальные повреждения; 2 – зона концентрации; 3 – зона разгрузки

Лавинообразное разрушение наступает, когда разность $V = A - Y \rightarrow \max$ (при $p = \text{const}$). Критическое значение определяется из уравнения $\frac{dV}{dl_x} = 0$.

Тогда критический размер локального повреждения при заданной нагрузке определяется:

$$l_{x\text{кр}} = \beta E / \pi p^2.$$

Используя величины $V = Lh$ – площадь сечения грунтового массива, $C = EL/h$ – коэффициент относительной жесткости горизонтального сечения грунтового массива, получаем формулу:

$$l_{x\text{кр}} = \frac{\beta}{\pi} \frac{V}{(pL)^2} C.$$

Формула отражает общие закономерности появления критического размера зоны локального повреждения и появления лавинообразного разрушения:

- 1) критический размер ЛП увеличивается с ростом размеров грунтового массива;
- 2) критический размер ЛП увеличивается с ростом жесткости, то есть увеличения общего модуля деформации грунта;
- 3) критический размер ЛП уменьшается с увеличением внешней нагрузки.

Влияние жесткости штампа на рассматриваемый процесс можно представить на следующей схеме (рис. 3), в которой ЛП находится непосредственно под ним.

По данной схеме размеры зоны разгрузки (3) уменьшаются. При изгибе штампа в зоне ЛП рас-

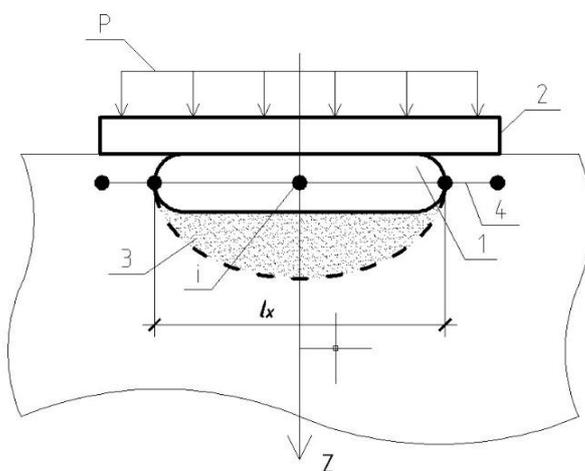


Рис. 3. Схема к определению влияния жесткости «штампа» на лавинообразное разрушение грунтового основания: 1 – локальное повреждение; 2 – штамп; 3 – зона разгрузки; 4 – зона концентрации напряжений

ходуется энергия перемещения нагрузки p на величину прогиба, равного величине осадки.

Вариант 1. Энергия из зоны разгрузки увеличивается на величину энергии деформирования штампа, что дает уравнение

$$l_x \cdot \beta - \left(\frac{p^2}{2E} \pi l_x^2 + K_1 \cdot \frac{l_x}{E_{ш} J_{ш}} \right) = 0,$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности между энергией перемещения штампа и его жесткостью.

Критическое значение ЛП:

$$l_{x,кр} = \left(\beta - K_1 \cdot \frac{1}{E_{ш} J_{ш}} \right) \cdot \frac{2E}{p^2 \pi}.$$

Вариант 2. Изменение энергии зоны разгрузки учитывается показателем энергии деформирования штампа, что дает уравнение

$$l_x \cdot \beta - \frac{p^2}{2E} \pi l_x^2 \cdot K_2 \cdot \frac{1}{E_{ш} J_{ш}} = 0,$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности.

Из этого уравнения получаем критический размер ЛП:

$$l_{x,кр} = \frac{\beta \cdot 2E \cdot E_{ш} J_{ш}}{\pi \cdot p^2 \cdot K_2}.$$

Из полученных формул следует вывод о том, что увеличение жесткости штампа приводит к увеличению критического размера ЛП, после достижения которого возникает лавинообразное разрушение грунтового основания. Формулы могут иметь разные числовые оценки. Вопрос оценки решается проведением опытов и моделированием процесса развития размеров ЛП при изменении нагрузки на штамп.

Влияние значений V и C косвенно подтверждается экспериментальными исследованиями на образцах из бетона, стали и пластмасс, имеющих локальные повреждения в виде надрезов, вырезов различной формы [38, 39, 46].

Для грунтового основания в виде полуплоскости или полуплоскости вопрос о размерах

учитываемого грунта при определении критического размера ЛП остается нерешенным.

Решение этого вопроса на теоретическом уровне может быть произведено введением «зоны напряженного состояния» грунтового основания.

Первое направление – установление зоны наличия вертикальных нормальных напряжений определенного уровня, ограниченной изобарой (уровень – отношение σ_z / p ниже предельного состояния (начальное критическое давление) (рис. 4, а).

Второе направление – установление зоны напряженного состояния грунтового основания – состоит в ограничении его линиями скольжения (предельное состояние при величине второго критического давления) (рис. 4, б).

Теоретическое решение этого вопроса понятно и возможно, но корректировку в это решение необходимо внести после проведения опытов.

Предварительные выводы:

1. Расчет на лавинообразное разрушение грунтового основания необходимо осуществлять с учетом появления критического размера ЛП (локального повреждения). При размерах локального повреждения меньше критического грунтовое основание сохраняет несущую способность.

2. Установлены предварительно закономерности влияния на величину критического размера локального повреждения параметров грунтового основания, жесткости штампа, величины давления под ним на грунт.

Постановка экспериментальных исследований влияния локальных повреждений грунтового основания на величину осадки и появление лавинообразного разрушения

Любые теоретические построения и модели нуждаются в экспериментальном обосновании. Эксперименты по определению несущей способности оснований проводились В.И. Курдюмовым. Обычно опыты проводились на моделях в лабора-

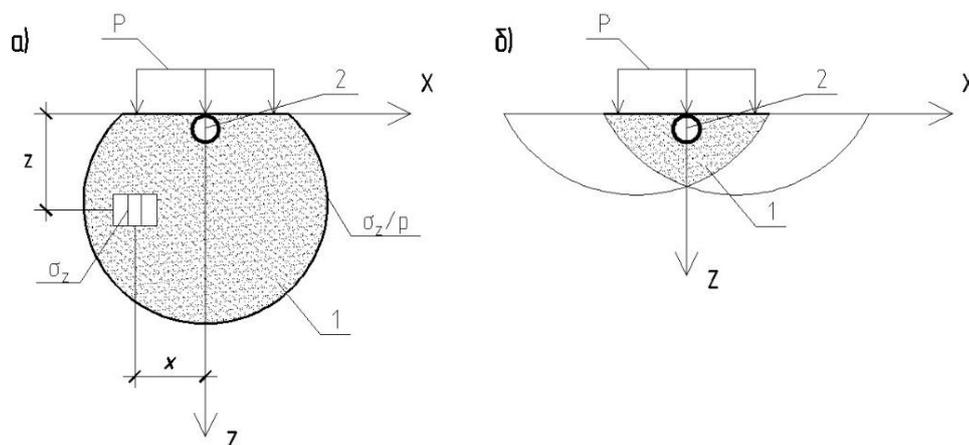


Рис. 4. К определению зоны напряженного состояния грунтового основания при определении критического размера ЛП: а) по изобарам; б) по линиям скольжения: 1 – зона напряженного состояния; 2 – ЛП

торных условиях [47]. Следует отметить опыты во ВНИИГ [47], во ВНИИВОДГЕО, а также эксперименты И. Бринч Хансена, Муса и Вейсса [48, 49] и библиографию А. Весича [50, 51]. Также можно выделить опыты В.Н. Широкова (ЮУрГУ, кафедра строительной механики), Г.М. Ломидзе, А.Л. Крижановского, М.В. Малышева [47]. Обобщение результатов экспериментальных исследований условий прочности грунтов дано в книгах [47, 52].

Экспериментальных исследований грунтовых оснований с начальными дефектами и дефектами в виде локальных повреждений нагруженных грунтовых массивов (стадия эксплуатации) в научной литературе не установлено.

В связи с этим постановка таких опытов является актуальной. Актуальность также подтверждается опытом эксплуатации зданий и сооружений (повреждения и разрушения сооружений от локальных повреждений грунтового основания).

Предполагается разработка моделей в виде «лотков» и проведение испытаний по двум схемам.

Схема 1. В искусственно созданном грунтовом основании создаются пустоты, моделирующие появление локальных повреждений в различных точках грунтового массива, имеющего определённые механические характеристики. Нагружение осуществляется штампом с определенной жесткостью на изгиб путем ступенчатого увеличения внешней нагрузки. В процессе нагружения фиксируется осадка штампа и строится зависимость $S = f(p)$, по которой определяется скорость dS/dp . За время выдержки ступени нагрузки фиксируется влияние времени на нарастание $S(t)$.

По изменению скорости dS/dp фиксируется наступление (или ненаступление) лавинообразного разрушения грунтового основания. Сравнение результатов нагружения с наличием локального повреждения и без него устанавливает его влияние на зависимость $S = f(p)$.

Схема 2. Искусственно созданное грунтовое основание нагружается штампом до определённого уровня напряженного состояния (предположительно эксплуатационный уровень, установленный по механическим характеристикам грунта). Затем создается локальное повреждение в определенных зонах грунтового основания, которое является нагруженным. Фиксируется изменение осадки в момент появления локального повреждения и его рост в течение определенного промежутка времени. Размеры повреждения искусственно увеличиваются до момента появления ускоренного развития осадки. Наступление такого момента трактуется как лавинообразное разрушение, а соответствующий размер локального повреждения трактуется как критический.

На основании таких опытов могут быть установлены основные закономерности, а также по-

добраны и скорректированы методы расчета, необходимые для практического применения.

Указанные схемы проведения опытов реализуются на одной модели в виде лотка. Размеры модели определяются возможностями создания нагрузки на штамп (грузы и гидравлические машины).

Моделирование процесса лавинообразного разрушения грунтового основания в системе «основание – фундамент» или «основание – сооружение»

В соответствии с механикой твердого тела [53] следующая система уравнений позволяет определить напряженно-деформированное состояние в любой точке системы, а также вычислить ее перемещения:

- условия равновесия –

$$\sum F_i = 0; \quad (1)$$

- условия совместности перемещений (деформаций) –

$$\sum \Delta_i = 0; \quad (2)$$

- физические условия деформирования элементов системы и материалов –

$$F_i = \varphi(\Delta_i). \quad (3)$$

При наличии движения масс в системе условия (1) дополняются зависимостью (законом) –

$$F_i = a_i m_i. \quad (4)$$

Для выполнения расчетов принимается режим нагружения

$$dF_i / dt. \quad (5)$$

Физические условия (3) принимаются в виде линейной зависимости (закон Гука), нелинейной (пластичность), дифференциальных или интегральных уравнений (ползучесть).

На основе системы уравнений (1)–(4) разработаны упрощенные методы путем введения дополнительных условий.

Задача восприятия системой максимальных нагрузок решается сравнением возникающих напряжений деформаций или перемещений с допускаемыми величинами, которые определяются по различным теориям прочности материалов и элементов конструктивной системы.

В такой постановке задача о взаимодействии зданий (сооружений) с грунтовым основанием приводится к определению зависимости «давление – осадка», а также величины предельного давления и его критического значения, вызывающего лавинообразное разрушение грунтового основания и конструктивной системы сооружения.

Упрощения расчетов направлены на снижение трудоемкости при их использовании на практике проектирования или исследования. Так, в теории предельного равновесия грунтового основания предполагается в качестве дополнительного усло-

вия достижение предельного состояния во всех точках грунтового массива. С целью уточнения физической зависимости для грунтов разработаны методы совмещения теории предельного равновесия грунтов с теорией пластичности [39]. Эти разработки создают большие сложности для практического применения при ручных расчетах.

Моделирование структур с начальными дефектами, по-видимому, началось с работ А. Гриффитса и продолжает развиваться [39, 54, 55]. Решались задачи распределения напряжений около эллиптических и круглых полостей [47, 56].

В [39] приведен подробный анализ результатов исследований по механике твердого тела. Имеется экспериментальный анализ напряжений и деформаций, проведенный Р. Эвансом и М. Маратом, для искусственных полостей в виде квадратных и круглых форм в растянутом бетоне. Установлено появление в зоне концентрации напряжений диаграмм «напряжение – деформация» нисходящей ветви после достижения максимальных напряжений.

Ю.В. Зайцевым [39] проведен анализ напряжений около полостей различной формы (треугольной, квадратной, круглой и эллиптической). Приведены модели концентраций напряжения около отверстий случайной формы и дано представление этих напряжений в виде случайной функции центрального угла. Показана возможность применения этих результатов к описанию концентраций напряжений около пор, имеющих случайную форму.

Получено математическое описание роста трещин около круглых отверстий в однородной пластине. Рассмотрены случаи как кратковременного, так и длительного сжатия.

Ф.Х. Виттман, Ю.В. Зайцев, К. Кришнасами [39] экспериментально показали, что в бетоне до нагружения имеются дефекты. Там же приведены результаты применения метода Монте-Карло для описания развития трещин, а также изложена теория развития трещин в пористом вязкоупругом материале.

В работе [57] изучался механизм изменения структуры (трещинообразования) в зоне концентраторов напряжений.

В научной литературе [39] имеются предложения по использованию и применению МКЭ к определению коэффициентов интенсивности напряжений (K_{IC} , G_{IC}) для ортотропных материалов. Развитие данного направления может быть целесообразно для грунтовых оснований с учетом специфических свойств грунта.

Необходимо отметить исследования [46], проведенные с использованием методов фотоупругости, микросеток и муаровых полос в зонах концентраций напряжений. Установлено, что в таких зонах критериями разрушения материала являются величина деформации сдвига (угол $\gamma_{d \max}$) и величина градиента депланационного сдвига ($\text{grad } \gamma_d$).

Последний принимает максимальное значение не в местах максимально нормальных напряжений, а в прилегающих зонах резкой депланации. Такой подход может быть применен к грунтам, для которых предельное сопротивление принимается по направлению сдвига (закон Кулона).

В литературе рассматривается вопрос изменчивости (неоднородности) грунтов в основании зданий и сооружений с учетом динамических воздействий [28, 29, 33].

При использовании ЭВМ многие сложности исчезают, а практическое применение затрудняется ввиду ограниченного количества программных комплексов и их экспериментальной проверки.

При постановке задачи, указанной в данной статье, предполагается использование конечно-элементных программных комплексов.

Возможность применения теорий линейно-деформируемых тел при небольших напряжениях показал Н.М. Герсеванов (напряжение в грунте $\sigma_{гp} \leq 0,3 \dots 0,4$ МПа) [39].

При использовании ПК «ЛИРА» для моделирования зависимости « $P-S$ » (давление – осадка) в рамках данного исследования принимаются следующие предположения:

- 1) упругие характеристики модуля упругости (E) и коэффициент поперечной деформации (μ) в ПК «ЛИРА» должны соответствовать аналогичным характеристикам грунта так, чтобы их соотношения были одинаковы;
- 2) значения E и μ в ПК «ЛИРА» назначаются так, чтобы величина осадки, вычисленная в данной программе, равнялась осадке, вычисленной по рекомендациям [17, 47].

Первое предположение реализуется следующим образом: используются формулы сжимаемости грунтов и зависимости осадки от давления. Составляются отношения:

$$A. \frac{E}{\mu} = \frac{0,76}{a_0 \cdot 0,21} = \frac{3,62}{a_0};$$

$$B. \frac{E}{\mu} = \frac{1 - 2\mu^2}{\frac{a}{1 + e_0} \cdot \mu};$$

$$B. \frac{E}{\mu} = \frac{\beta}{a_0 \cdot \mu}.$$

С учетом последнего соотношения (B) и данных таблицы [19] вычисляются отношения для разных видов грунтов:

- пески – $\frac{E}{\mu} = \frac{0,76}{a_0 \cdot 0,21} = \frac{3,62}{a_0}$;
- суглинки, супеси – $\frac{E}{\mu} = \frac{0,63}{a_0 \cdot 0,30} = \frac{2,10}{a_0}$;
- глина – $\frac{E}{\mu} = \frac{0,42}{a_0 \cdot 0,40} = \frac{1,05}{a_0}$;

где a_0 – начальный коэффициент пористости (объем пор / объем твердых частиц).

Значения коэффициента бокового расширения β и коэффициента поперечной деформации μ представлены в таблице [19].

Зависимость коэффициентов от вида грунта

Вид грунта	β	μ
1 Песок	0,76	0,21–0,29
2 Суглинок, песок	0,63	0,30–0,37
3 Глина	0,42	0,40

Составляется расчетная схема грунтового основания для ПК «ЛИРА», и с использованием второго предположения определяются величины E и μ с учетом значения a_0 . Затем производится расчет на заданный режим нагружения с целью анализа влияния локального повреждения грунтового основания на его напряженно-деформированное состояние, определения осадок и критического значения внешнего вертикального давления.

Локальное повреждение грунтового основания моделируется назначением E и μ , близкими к нулю в определенных зонах: около подошвы фундамента по его оси и около края; на некоторых расстояниях от подошвы в направлении оси z . Размеры локального повреждения моделируются назначением E и $\mu \rightarrow 0$ от одного до нескольких КЭ в расчетной схеме (рис. 5).

В процессе нагружения (по определенному режиму) предельное состояние в точке (i) грунта устанавливается сравнением напряжений (определенных расчетом) с предельным сопротивлением:

- сыпучие грунты – $\tau = p_i \cdot \text{tg} \varphi$;
- связные грунты – $\tau = c + p_i \cdot \text{tg} \varphi$,

где c – удельное сцепление; φ – угол внутреннего трения; p_i – давление в точке i .

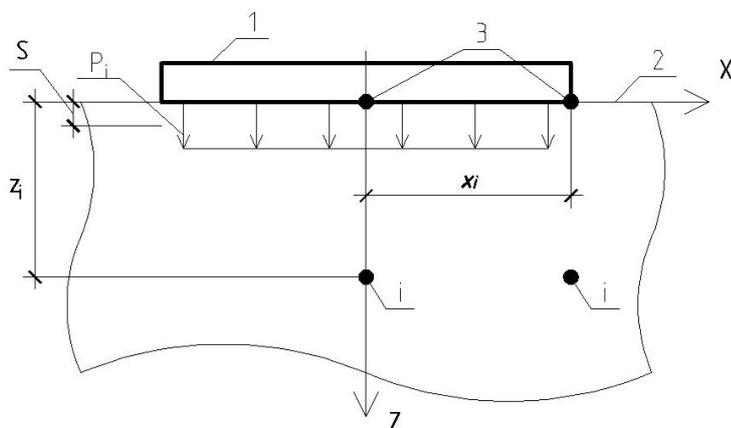


Рис. 5. Схема расположения локальных повреждений грунтового основания: 1 – фундамент; 2 – грунтовое основание; 3 – локальное повреждение; Z_i , X_i – координаты положения локального повреждения

При установлении КЭ, в которых достигается предельное сопротивление, назначается E и $\mu \rightarrow 0$ и расчет повторяется. Таким образом, по данной схеме реализуется ряд линейных расчетов с корректировкой параметров E и μ . Такой расчет позволяет получить зависимость «осадка – давление» с учетом локальных повреждений в разных зонах грунтового массива и установить влияние этих зон в зависимости от места их расположения и их размеров. Критический размер зоны локального повреждения определяется по изменению скорости ds/dp .

При расчетах с применением ЭВМ формулы определения (τ) в зависимости от вида грунта не удобны, так как нарушается непрерывность изменения прочности на сдвиг в зависимости от параметров влияния.

В связи с этим предлагается ввести характеристику связности грунтов в виде коэффициента α , зависящего от отношения R_t / R_c , где R_t и R_c – соответственно сопротивление растяжению и сжатию:

$$\alpha = 1 - e^{-\beta R_t / R_c}.$$

Тогда сопротивление сдвигу

$$\tau = \alpha \cdot c + p \cdot \text{tg} \varphi.$$

При $R_t = 0$ (сыпучий грунт) значение $\alpha = 0$ и $c = 0$. При $R_t \neq 0$ коэффициент α принимает определенное значение. Параметр β и коэффициент α устанавливается экспериментально испытанием грунтов на сдвиг с разным содержанием частиц грунта, обеспечивающих связность.

Уточнение результатов моделирования предполагается осуществить путем учета восстанавливающейся деформации грунта после его разгрузки (рис. 6).

Наличие восстанавливающейся деформации грунта наблюдалось в опытах [58]. Появление этих

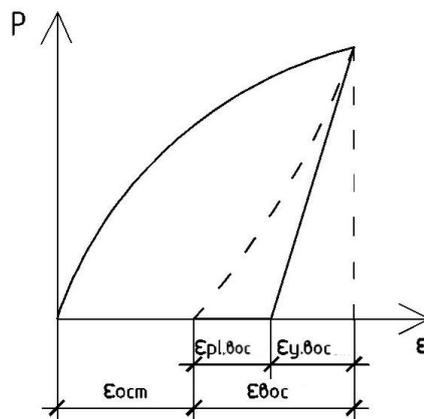


Рис. 6. Деформирование грунта при разгрузке: $E_{ост}$ – остаточная деформация; $E_{вос}$ – восстанавливающаяся деформация, состоящая из упругой ($E_{y,вос}$) и неупругой ($E_{pl,вос}$) частей

Обзоры

деформаций наблюдалось в лабораторных работах (ЮУрГУ, Челябинск), проводимых на модели дороги при воздействии колеса автомобиля на покрытие (рис. 7). В модели использовался грунт суглинок с характеристиками $J_L = 0,30$; $\varphi = 25$; $c = 0,35$; $e_0 = 0,51$. Восстанавливающаяся часть деформации составляла 25–30 % от общей деформации (в виде осадки поверхности под действием штампа).

Предполагается следующий механизм влияния восстанавливающейся части деформации на распределение напряжений около локального повреждения грунта.

До появления локального повреждения напряжение распределяется согласно исходным данным и расчетной схеме (обозначим σ_{oi} , где i – положение точки в системе).

После появления локального повреждения образуются зоны разгрузки (рис. 8) и зоны концентрации напряжений (зона «3»). В этой зоне напряжение увеличивается от внешнего давления P :

$$\sigma_i = \sigma_{oi} + \Delta\sigma_{pi}$$

В результате появления зоны 2 (зоны разгрузки) происходит восстановление части деформации. Зоны 2 увеличиваются в направлении к центру локального повреждения (поз. 5). Проявляются сдвигающие усилия, которые создают дополнительные напряжения в зонах 3. Общее напряжение:

$$\sigma_i = \sigma_{oi} + \Delta\sigma_{pi} + \Delta\sigma_{bi}$$

где $\Delta\sigma_{bi}$ – дополнительное напряжение от восстановления части деформации.

Более простая схема может быть представлена следующим образом (рис. 9).

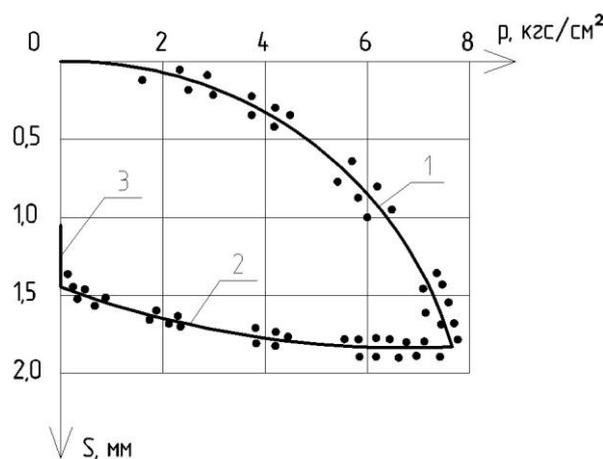


Рис. 7. Зависимость $S = F(p)$ (осадка – давление) на штамп размером 30×30 мм на модель дороги (толщина покрытия – слой бетона 7...10 мм, грунт – суглинок с толщиной слоя 50 см, ширина – 100 см в металлической раме). Показатели грунта при испытании: $J_L = 0,30$; $\varphi = 25$; $c = 0,35$; $e_0 = 0,51$: 1 – при возрастании давления; 2 – при уменьшении давления; 3 – при выдержке без давления в течение 24 часов

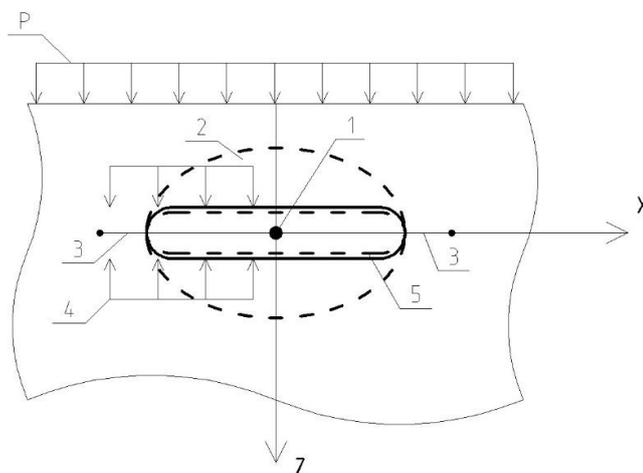


Рис. 8. Схема к учету влияния восстанавливающейся деформации грунта при его разгрузке: 1 – локальное повреждение; 2 – зоны разгрузки; 3 – зона концентрации напряжений (зона «3»)

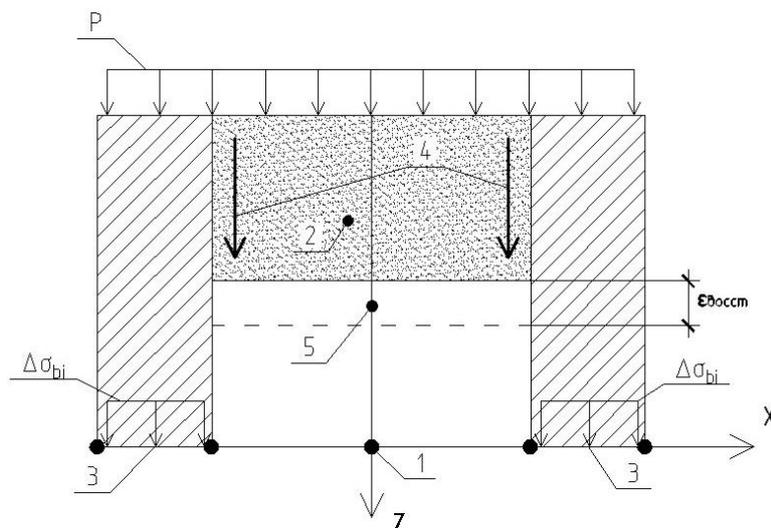


Рис. 9. Схема к учету влияния восстанавливающейся деформации грунта при его разгрузке

Рассмотренная схема в ПК «ЛИРА» реализуется путем задания «вынужденной» деформации в отдельных КЭ. С целью определения дополнительных напряжений – $\Delta\sigma_{bi}$.

Предполагается сопоставление полученных результатов с результатами расчета в теории упругости по определению перемещений поверхности полупространства под действием штампа:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot (1 - \mu^2)}{\pi^2 a E} \cdot P; \quad \omega_a = \frac{2(1 - \mu^2)}{\pi^2 a E} \cdot P,$$

где E – модуль упругости; a – радиус штампа; P – усилие на штамп.

Предварительные выводы по обзору моделирования процессов деформирования и напряжений с появляющимися (или начальными) полостями в однородных материалах:

1. Моделирование произведено в материале, обладающем сопротивлением к сжатию, растяжению и сдвигу. Применение этих исследований к грунтам может быть ограниченным. Это ограничение обусловлено тем, что грунты обладают сопротивлением сжатия и сдвига. Сопротивление их растяжению очень незначительно. Следовательно, при использовании методов механики разрушения к грунтам необходимо учитывать отсутствие у грунтов сопротивления растяжению и наличие небольшого сопротивления растяжению для связных грунтов.

2. Моделирование процесса взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием, имеющим локальные зоны с существенно пониженными характеристиками, с целью проведения расчетов в практике проектирования целесообразно выполнять на существующих программных комплексах.

Общие выводы

1. Исследователи достаточно много уделяли внимания развитию механики твердых тел при наличии в них дефектов и повреждений. Разработаны модели для ручного счета и для применения ЭВМ. Проведен большой объем экспериментальных исследований на различных материалах.

Задача лавинообразного разрушения для материалов получила практическое применение.

Задача лавинообразного разрушения конструкций поставлена, но не определена полностью, так как не решен вопрос о «критических размерах зоны повреждения» конструктивных систем, в которых по аналогии с материалами может наблюдаться две стадии:

1) стадия устойчивого развития повреждений без появления лавинообразного разрушения;

2) стадия, при которой после достижения критических «размеров зоны повреждения» наступает лавинообразное разрушение.

2. В научной литературе не поставлена задача определения осадок при локальном повреждении грунтового основания (вымыв полости или локальное существенное снижение характеристик грунта (далее ЛПГ – локальное повреждение грунта).

3. Не обнаружены экспериментальные исследования по п. 1.

4. Практическое значение этих исследований состоит в том, что путем расчетного прогнозирования этих явлений можно определить необходимые мероприятия не интуитивно, а расчетным путем, что обеспечит повышение безопасности эксплуатации зданий и сооружений (требование закона № 384-ФЗ).

5. Не обнаружены апробированные методы решения задачи определения осадок с учетом ЛПГ в виде образования полостей с существенно пониженными характеристиками грунта или пустот.

6. Не обнаружены исследования по влиянию размера ЛППГ по отношению к размеру подошвы фундамента, области напряженного состояния грунтового массива, жесткости фундамента на величину осадки.

7. Возникает задача разработки практических методов прогнозирования осадок с учетом ЛППГ и влияния времени, а также условий эксплуатации.

8. Для разработки практических методов расчета осадок с учетом ЛППГ необходимо решить следующие задачи:

а) определение критического размера ЛППГ, при котором исчерпывается несущая способность грунтового основания;

б) математическое моделирование процесса изменения напряженного и деформированного состояния грунтового основания (включая нарастание осадок) с учетом ЛППГ;

в) учет статистической изменчивости основных параметров системы «сооружение – грунтовое основание» при наличии ЛППГ (вероятностные расчеты).

Литература

1. Райтман, А.Г. Деформации и повреждения зданий / А.Г. Райтман. – М.: Стройиздат, 1987. – 160 с.
2. Повреждения зданий // Сокр. пер. с англ. Г.А. Ивановой; под ред. И.А. Петрова. – М.: Стройиздат, 1982. – 144 с.
3. Рибцики, Р. Повреждения и дефекты строительных конструкций / Р. Рибцики, пер. с нем. К.Ф. Плитта. – М.: Стройиздат, 1982. – 432 с.
4. Попов, Г.Т. Техническая экспертиза жилых зданий старой застройки / Г.Т. Попов, Л.Я. Бурак. – Л.: Стройиздат, 1986. – 240 с.
5. Предупреждение деформаций и аварий зданий и сооружений / под ред. В.А. Лисенко. – Киев: Будивельник, 1984. – 120 с.
6. Мосенкис, Ю.М. Анализ результатов натурных наблюдений за деформациями зданий на оттаивающих грунтах / Ю.М. Мосенкис // Исследования и материалы по строительству и эксплуатации зданий и сооружений на мерзлых грунтах. – Забайкальский филиал Географического общества СССР. – Чита, 1974.
7. Рыжков, Е.М. Изменение влажности в результате тепловлагопереноса в основаниях зданий и сооружений / Е.М. Рыжков // Основания фундаментов и механика грунтов. – 1971. – №1.
8. Zurowski, A. Odkaztalecnie budynkow wysoko posadowi i onych na palach / A. Zurowski. – *Ynzynieria I Budowictwo*. – 1973. – № 5. – С. 220–223.
9. Васечко, А.В. Аварии и деформации зданий, возведенных на неоднородных грунтах / А.В. Васечко // Основания фундаментов и механика грунтов. – 1973. – № 5.
10. Пилягин, А.В. Причины аварий и повреждений некоторых промышленных объектов в Йошкар-Оле / А.В. Пилягин, Э.А. Зейтулаев // *Промышленное строительство*. – 1975. – № 1.
11. Дементьев, А.И. Итоги многолетней эксплуатации некоторых инженерных сооружений, возведенных на вечномерзлых грунтах / А.И. Дементьев // Исследование и материалы по строительству и эксплуатации зданий и сооружений на мерзлых грунтах. – Забайкальский филиал Географического общества СССР, Чита, 1974.
12. Болдырев, Г.И. Особенности развития осадок различных видов зданий в процессе строительства / Г.И. Болдырев, Ю.В. Россихин // Исследования по механике строительных материалов и конструкций. – 1972. – № 6.
13. Деформации конструкций зданий, вызываемые недопустимыми осадками фундаментов, и причины их возникновения / С.А. Костылев, В.Г. Девятов, В.В. Спасоломский, Г.М. Сюдюков // Сборник трудов Инженерно-строит. факультета ЧПИ, «Железобетонные конструкции» / под ред. А.А. Оатула. – 1963. – Вып. 3. – С. 183–198.
14. Григорьев, Г.М. Натурные испытания 9-этажного жилого дома / Г.М. Григорьев, С.Н. Клепиков, И.А. Розенфельд // *Строительство и архитектура*. – 1973. – № 3.
15. Прогрессирующее обрушение железобетонного башенного сооружения / В.М. Левин, В.С. Гудромович, В.А. Митраков и др. // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – 2009. – Вып. 12. – С. 214–223.
16. Осадка фундаментов. Обзор по ряду стран Африки, Америки и Европы. // *Vatir*. – 1970. – № 189. – С. 37–42.
17. Руководство по проектированию оснований зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1977. – 376 с.
18. Швецов, Г.И. Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты: учебн. для вузов / Г.И. Швецов. – 2-е изд., доп. – М.: Высшая школа, 1997. – 319 с.
19. Пинскер, Г.М. Расчет и конструирование фундаментов промышленных зданий / Г.М. Пинскер. – Киев: Будивельник, 1973. – 152 с.
20. Ривкин, С.А. Расчет фундаментов / С.А. Ривкин. – Киев: Будивельник, 1967. – 148 с.
21. Агошков, А.К. К вопросу о послепостроечных изменениях грунтовых оснований аэродромных покрытий / А.К. Агошков // *Вестник МГУ*. – 1960. – № 1.
22. Потапов, В.А. Аналогия в размещении температурных и влажностных полей в основаниях зданий и сооружений в условиях плоского теплового потока / В.А. Потапов // *Архитектура и строительство*. – Ташкент: Ташкентский технический институт, 1973. – Вып. 100.
23. Ахентштейн, Г.Н. Об одной из причин образования трещин в стенах зданий / Г.Н. Ахентштейн // *Материалы научно-технической конференции ВНИИ геологии нерудных полезных ископаемых*. – Уфа: Татарское изд-во, 1972.

24. Исайкин, А.Я. Вероятностные методы в расчетах строительных конструкций / А.Я. Исайкин, Д.А. Табаков, В.А. Уланский // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – М., 2006. – Вып. 10. – С. 201–209.
25. Клюева, Н.В. К анализу живучести внезапно поврежденных железобетонных пространственных конструкций / Н.В. Клюева, В.Н. Колчунов, М.Ю. Прокуров // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – М., 2006. – Вып. 10. – С. 222–228.
26. Смоляго, Г.А. Оценка ресурса конструктивной безопасности железобетонных пространственных конструкций по трещиностойкости и деформативности / Г.А. Смоляго // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – М., 2006. – Вып. 10. – С. 243–249.
27. Бондаренко, В.М. Износ, повреждение и безопасность железобетонных конструкций / В.М. Бондаренко, А.В. Боровских. – М.: ИД Русанова, 2000. – 144 с.
28. *Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary ASCE 4-98*. – Reston, Virginia, USA, 1999.
29. Тяпин, А.Г. Варьирование свойств грунтового основания в алгоритме модификации исходного сейсмического воздействия / А.Г. Тяпин // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2008. – № 4. – С. 44–47.
30. Ведяков, И.И. К вопросу о живучести строительных конструкций / И.И. Ведяков, П.Г. Еремеев // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2008. – № 4 (219). – С. 76–78.
31. *Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях*. – М.: Москомархитектура, 2002.
32. *Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения*. – М.: ГУП НИИАЦ, 2006.
33. Кузьменко, В.И. Модели статического и динамического взаимодействия сооружения с основаниями сложных типов (по включениям и свойствам) / В.И. Кузьменко, В.В. Кулябко, Ю.Е. Влащенко // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – 2009. – Вып. 12. – С. 194–202.
34. Алехин, В.Н. Система поддержки принятия решений при проектировании конструкций зданий и сооружений с учетом риска их возможного лавинообразного разрушения / В.Н. Алехин, А.Б. Ханина, А.Г. Павленко // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – 2009. – Вып. 12. – С. 203–208.
35. Еремеев, П.Г. Защита большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения / П.Г. Еремеев // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – 2009. – Вып. 12. – С. 209–213.
36. Еремеев, П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2006. – № 2. – С. 65–71.
37. *Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федер. закон РФ от 30 декабря 2009 г.*
38. Фридман, Я.Б. *Механические свойства материалов. Часть 1. Деформации и разрушения* / Я.Б. Фридман. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 427 с.
39. Зайцев, Ю.В. *Механика разрушения для строителей: учебное пособие для строительных вузов* / Ю.В. Зайцев. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.
40. Ивашенко, Ю.А. Исследование процесса разрушения бетона при разных скоростях деформирования / Ю.А. Ивашенко, А.Д. Лобанов // *Бетон и железобетон*. – 1984. – № 11. – С. 14–15.
41. Райзер, В.Д. *Теория надежности сооружений* / В.Д. Райзер. – М., 2009. – Вып. 12. – С. 203–208.
42. Ветошкин, А.Г. *Обеспечение надежности и безопасности в техно-сфере* / А.Г. Ветошкин. – М.: Лань, 2016. – 236 с.
43. Вентцель, Е.С. *Теория вероятностей и ее инженерные приложения* / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2010. – 480 с.
44. Райзер, В.Д. *Анализ надежности конструкций при неразрушающем контроле* / В.Д. Райзер // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2010. – № 4. – С. 40–42.
45. Griffith, A.A. *The Theory of Rupture* / A.A. Griffith. – *Pros. 1-st Intern. Congr. Appl. Mech. Delft, 1924.* – P. 55–63.
46. Андреев, А.В. *Критерии прочности для зон концентрации напряжений*. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
47. Малышев, М.В. *Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений* / М.В. Малышев. – М.: Стройиздат, 1980. – 136 с.
48. Brinch Hansen, J. *A revised and extended formula for bearing capacity* // *Danish Geotechnical Institute*. – 1970. – *Bulletin* № 28.
49. Muhs, H. *Untersuchung von Grenztragfähigkeit und Setzungsverhalten flachgegründeter Einzel-fundamente im ungleichförmigen nichtbindigen* / H. Muhs, K. Welss // *Boden Mitteilungen der Degebo an der Technischen Universität, Berlin*. – 1971. – *Hef* 26.
50. Cornforth, D.H. *Some Experiments on the Influence Strain Conditions on the Strength of Sand* / D.H. Cornforth // *Geotechnique*. – 1964. – № 2.
51. Vesic, A.S. *Bearing capacity of shallow foundations* / A.S. Vesic, H.E. Winter-Korn, H.-J. Fang // *Foundation Engineering Handbook*. – Van Nostrand Reinhold Company, New-York, 1975.
52. Евдокимов, П.Д. *Экспериментальное исследование несущей способности песчаных оснований вертикально нагруженных прямоугольных фундаментов* / П.Д. Евдокимов, П.Н. Кашкаров // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. – 1976. – Т. 111.

53. Справочник проектировщика промышленных и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. В 2 кн. Кн. 1. / под ред. А.А. Уманского. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.

54. Френкель, В.М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах / В.М. Френкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

55. Работнов, Ю.Н. Введение в механику разрушения / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1987. – 80 с.

56. Савин, Г.Н. Распределение напряжений около отверстий / Г.Н. Савин. – Киев: Наукова Думка, 1968.

57. Krishnaswamy, K.T. Mechanism of failure and microcracking of plain concrete under uniaxial tensile loading / K.T. Krishnaswamy // *Indian Concrete Journal*. – 1971. – 45, № 5.

58. Горбунов-Посадов, М.И. Современное состояние научных основ фундаментостроения / М.И. Горбунов-Посадов. – М.: Наука, 1967.

Ивашенко Юлий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ivashenkoia@susu.ru

Серебrenникова Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), serebrennikovaen@susu.ru

Урumbaев Амир Жанатович, студент кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), urumbaevamir@yandex.ru

Поступила в редакцию 6 декабря 2021 г.

DOI: 10.14529/build220107

ON THE AVALANCHE-LIKE DESTRUCTION OF SOIL BASE

Yu.A. Ivashenko, ivashenkoia@susu.ru

E.N. Serebrennikova, serebrennikovaen@susu.ru

A.Zh. Urumbaev, urumbaevamir@yandex.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Reliability and performance of load-bearing building structures is of paramount importance when designing buildings and structures. An important factor in the work of the frame is the soil base and foundations. However, in construction practice, there are cases of the formation of voids in the soil mass due to washing out, decompaction of the soil. The existing theories of the work of bodies in case of local damage are considered, however, studies in this direction in relation to the soil base have not been found. A research plan for identifying the dependences of the foundation settlements on the action of an external load is described, taking into account local soil damage, identifying the critical dimensions of local damage, upon reaching which an avalanche-like destruction of the soil mass begins.

Keywords: local damage, soil base, avalanche-like destruction, ground stress, foundation settlements, critical damage.

References

1. Raytman A.G. *Deformatsii i povrezhdeniya zdaniy* [Deformations and Damage to Buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 160 p.

2. Petrov I.A. (Ed.) *Povrezhdeniye zdaniy* [Damage to Buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 144 p.

3. Ribitski R. *Povrezhdeniya i defekty stroitel'nykh konstruksiy* [Damage and Defects of Building Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 432 p.

4. Popov G.T., Burak L.Ya. *Tekhnicheskaya ekspertiza zhilykh zdaniy staroy zastroyki* [Technical Examination of Residential Buildings of Old Buildings]. Leningrad, Stroyizdat, 1986. 240 p.

5. Lisenko V.A. (Ed.) *Preduprezhdeniye deformatsiy i avariy zdaniy i sooruzheniy* [Prevention of Deformations and Accidents of Buildings and Structures]. Kiyev, Budivel'nik Publ., 1984. 120 p.

6. Mosenkis Yu.M. [Analysis of the Results of Field Observations of Deformations of Buildings on Thawing Soils]. *Issledovaniya i materialy po stroitel'stvu i ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy na merzlykh gruntakh. Zabaikalskiy filial geograficheskogo obshchestva SSSR* [Research and Materials on the Construction and Operation of Buildings and Structures on Frozen Soils – Transbaikal Branch of the Geographical Society of the USSR]. Chita, 1974. (in Russ.)

7. Ryzhkov E.M. [Moisture Change as a Result of Heat and Moisture Transfer in the Foundations of Buildings and Structures]. *Osnovaniya fundamentov i mekhanika gruntov* [Foundations of Foundations and Soil Mechanics], 1971, no. 1, pp. 14–15. (in Russ.)
8. Zurowski A. [Odkaztalecniya Budynkow Wysolich Posadow i Onych na Palach]. *Ynzynieria i Budowictwo*, 1973, no. 5. pp. 220–223.
9. Vasechko A.V. [Accidents and Deformations of Buildings Erected on Heterogeneous Soils]. *Osnovaniya fundamentov i mekhanika gruntov* [Foundations of Foundations and Soil Mechanics], 1973, no. 5.
10. Pilyagin A.V., Zeytulayev E.A. [Causes of Accidents and Damage to some Industrial Facilities in Yoshkar-Ola]. *Promyshlennoye stroitel'stvo* [Industrial Construction], 1975. no. 1. (in Russ.)
11. Dement'yev A.I. [The Results of Many Years of Operation of Some Engineering Structures Erected on Permafrost Soils] *Issledovaniye i materialy po stroitel'stvu i ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy na merzlykh gruntakh. – Zabaikalskiy filial Geograficheskogo obshchestva SSSR* [Research and Materials on the Construction and Operation of Buildings and Structures on Frozen Soils – Transbaikal Branch of the Geographical Society of the USSR]. Chita, 1974. (in Russ.)
12. Boldyrev G.I., Rossikhin Yu.V. [Peculiarities of the Development of Sediments of Various Types of Buildings During the Construction Process]. *Issledovaniya po mekhanike, stroitel'nykh materialov i konstruktsiy* [Studies in Mechanics, Building Materials and Structures], 1972, no. 6. (in Russ.)
13. Kostylev S.A., Devyatov V.G., Spasolomskiy V.V., Syundyukov G.M. [Deformations of Building Structures Caused by Unacceptable Settlements of Foundations, and their Causes]. *Sbornik trudov Inzhenerno-stroitel'fakul'teta ChPI, "Zhelezobetonnyye konstruktsii"*. Pod redaktsiyey A.A. Oatula [Collection of Works of the Faculty of Civil Engineering of CPI, "Reinforced Concrete Structures". Edited by A.A. Oatula], 1963, iss. 3, pp. 183 – 198. (in Russ.)
14. Grigor'yev G.M., Klepikov S.N., Rozenfel'd I.A. [Field Tests of a 9-Storey Residential Building]. *Stroitel'stvo i arkhitektura* [Construction and Architecture], 1973, no. 3. (in Russ.)
15. Levin V.M., Gudromovich V.S., Mitakov V.A., Gevlich I.G., Gritsuk Yu.V. [Progressive Collapse of a Reinforced Concrete Tower Structure]. *Prostranstvennyye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2009, iss.12, pp. 214–223. (in Russ.)
16. [Settlement of Foundations]. *Obzor po ryadu stran Afriki, Ameriki i Evropy* [Overview of a Number of Countries in Africa, America and Europe]. *Batir*, 1970, no. 189, pp. 37–42. (in Russ.)
17. *Rukovodstvo po proyektirovaniyu osnovaniy zdaniy i sooruzheniy* [Guidelines for the Design of Foundations for Buildings and Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977. 376 p.
18. Shvetsov G.I. *Inzhenernaya geologiya, mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Engineering Geology, Soil Mechanics, Bases and Foundations]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1997. 319 pp.
19. Pinsker G.M. *Raschet i konstruirovaniye fundamentov promyshlennykh zdaniy* [Calculation and Design of Foundations for Industrial Buildings]. Kiyev, Budivel'nik Publ., 1973. 152 p.
20. Rivkin S.A. *Raschet fundamentov* [Calculation of Foundations]. Kiyev, Budivel'nik Publ., 1967. 148 p.
21. Agoshkov A.K. [On the Issue of Post-Construction Changes in Soil Bases for Airfield Pavements]. *Bulletin of Moscow State University*, 1960, no. 1. (in Russ.)
22. Potapov V.A. [Analogy in the Placement of Temperature and Humidity Fields in the Foundations of Buildings and Structures under Conditions of a Flat Heat Flow]. *Arkhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and Construction]. Tashkent, Tashkentskiy tekhnicheskii institut, 1973, iss. 100. (in Russ.)
23. Akhentshteyn G.N. [On one of the Reasons for the Formation of Cracks in the Walls of Buildings]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii VNIN geologii nerudnykh poleznykh iskopayemykh* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference VNIN Geology of Non-Metallic Minerals]. Ufa, Tatarskoye izdatel'stvo Publ., 1972. (in Russ.)
24. Isaykin A.Ya., Tabakov D.A., Ulanskiy V.A. [Probabilistic Methods in the Calculations of Building Structures]. *Prostranstvennyye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2006, iss. 10, pp. 201–209. (in Russ.)
25. Klyuyeva N.V., Kolchunov V.N., Prokurov M.Yu. [To the Analysis of the Survivability of Suddenly Damaged Reinforced Concrete Spatial Structures]. *Prostranstvennyye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2006, iss. 10, pp. 222–228. (in Russ.)
26. Smolyago G.A. [Assessment of the Resource of Constructive Safety of Reinforced Concrete Spatial Structures in Terms of Crack Resistance and Deformability]. *Prostranstvennyye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2006, iss. 10, pp. 243–249. (in Russ.)
27. Bondarenko V.M., Borovskikh A.V. *Iznos, povrezhdeniye i bezopasnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Wear, Damage and Safety of Reinforced Concrete Structures]. Moscow, PH Rusanova Publ., 2000. 144 p.
28. [Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary]. *ASCE 4-98*, Reston, Virginia, USA. 1999.

29. Tyapin A.G. [Variation of the Properties of the Soil Base in the Algorithm for Modifying the Initial Seismic Impact]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Calculation of Structures], 2008, no. 4. pp. 44–47. (in Russ.)
30. Vedyakov I.I., Eremeyev P.G. [To the Question of the Survivability of Building Structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Calculation of Structures]. Moscow, FGUP «NITs Stroitel'stvo» Publ., 2008, no. 4 (219), pp. 76–78. (in Russ.)
31. *Rekomendatsii po zashchite zhilykh karkasnykh zdaniy pri chrezvychaynykh situatsiyakh* [Recommendations for the Protection of Residential Frame Buildings in Emergency Situations]. Moscow, Moskomarkhitektura Publ., 2002.
32. *Rekomendatsii po zashchite vysoznykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya* [Recommendations for the Protection of High-Rise Buildings from Progressive Collapse]. Moscow, GUP NIATs Publ., 2006.
33. Kuz'menko V.I., Kulyabko V.V., Vlasenko Yu.E. [Models of Static And Dynamic Interaction of a Structure with Foundations of Complex Types (by Inclusions and Properties)]. *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2009, iss. 12, pp. 194–202. (in Russ.)
34. Alekhin V.N., Khanina A.B., Pavlenko A.G. [Decision Support System in the Design of Structures of Buildings and Structures, Taking into Account the Risk of their Possible Avalanche Destruction]. *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2009, iss. 12, pp. 203–208. (in Russ.)
35. Eremeyev P.G. [Protection of Large-Span Structures from Avalanche-Like (Progressive) Collapse]. *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2009, iss. 12, pp. 209–213. (in Russ.)
36. Eremeyev P.G. [Prevention of an Avalanche-Like (Progressive) Collapse of Load-Bearing Structures of Unique Large-Span Structures under Emergency Impacts]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Calculation of Structures], 2006, no. 2, pp. 65–71. (in Russ.)
37. *Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy: Feder. zakon RF ot 30 dekabrya 2009 g* [Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures: Feder. Law of the Russian Federation of December 30, 2009].
38. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskiye svoystva materialov* [Mechanical Properties of Materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 427 p.
39. Zaytsev Yu.V. *Mekhanika razrusheniya dlya stroiteley: uchebnoye posobiye dlya stroitel'nykh vuzov* [Fracture Mechanics for Builders: Textbook for Construction Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 288 p.
40. Ivashenko Yu.A., Lobanov A.D. [Investigation of the Process of Destruction of Concrete at Different Rates of Deformation]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 1984, no. 11. pp. 14–15. (in Russ.)
41. Rayzer V.D. *Teoriya nadezhnosti sooruzheniy. Nauchnoye izdaniye* [Theory of Reliability of Structures. Scientific Publication]. Moscow, 2009, iss.12, pp. 203–208. (in Russ.)
42. Vetoshkin A.G. *Obespecheniye nadezhnosti i bezopasnosti v tekhnosfere* [Ensuring Reliability and Safety in the Techno-Sphere]. Moscow, «Lan'» Publ., 2016. 236 p. (in Russ.)
43. Venttsel' E.S., Ovcharov, L.A. *Teoriya veroyatnostey i eye inzhenernykh eye inzhenernyye prilozheniya* [Probability Theory and its Engineering Applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010. 480 p.
44. Rayzer V.D. [Analysis of the Reliability of Structures in Non-Destructive Testing]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Calculation of Structures], 2010, no. 4. pp. 40–42. (in Russ.)
45. Griffith A.A. [The Theory of Rupture]. *Pros. 1st Intern. Congr. Appl. Mech. Delft*, 1924. pp. 55–63.
46. Andreyev A.V. *Kriterii prochnosti dlya zon kontsentratsii napryazheniy* [Strength Criteria for Stress Concentration Zones]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985. 152 p.
47. Malyshev M.V. *Prochnost' gruntov i ustoychivost' osnovaniy sooruzheniy* [Strength of Soils and Stability of Foundations of Structures]. Moscow, Sroyizdat Publ., 1980. 136 p.
48. Brinch Hansen J. [A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity]. *Danish Geotechnical Institute, DGI – Bulletin*, Copenhagen, 1970, no. 28.
49. Muhs H., Welss K. [Untersuchung von Grenztragfahigkeit unel Setzungsverhaeten Flachgegrundeter Einzelfundamente im Ungleichformigen Nichbindigen]. *Boden Mitteilungen der Degebo an der Technischen Univer-sitat*, Berlin, Helf 26, 1971.
50. Cornforth D.H. [Some Experiments on the Influence Strain Conditions on the Strength of Sand], *Geotechnique*, no. 2, 1964.
51. Vesic A.S., Winter-Korn H.E., Fang H.-J. [Bearing Capacity of Shallow Foundations: Foundation Engineering Handbook]. New-York, Van Norstrand Reinhold Company Publ., 1975.

52. Evdokimov P.D., Kashkarov P.N. [Experimental Study of the Bearing Capacity of Sandy Foundations of Vertically Loaded Rectangular Foundations]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneyeva* [Proceeding of the VNIIG], 1976, vol. 111. (in Russ.)
53. Umanskogo A.A. (Ed.) *Spravochnik proyektirovshchika promyshlennykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy* [Handbook of the Designer of Industrial and Public Buildings and Structures]. Moscow, Stroizdat Publ., 1972. 600 p.
54. Frenkel' V.M. *Fizika razrusheniya. Rost treshchin v tverdykh telakh* [Physics of Destruction. Growth of Cracks in Solids]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 376 p.
55. Rabotnov Yu.N. *Vvedeniye v mekhaniku razrusheniya* [Introduction to Fracture Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 80 p.
56. Savin G.N. *Raspredeleniye napryazheniy okolo otverstiy* [Stress Distribution Near Holes]. Kiyev, Naukova Dumka Publ., 1968.
57. Krishnaswamy K.T. [Mechanism of Failure and Microcracking of Plain Concrete under Uniaxial Tensile Loading]. *Indian Concrete Journal*, vol. 45, no. 5. 1971.
58. Gorbunov-Posadov M.I. *Sovremennoye sostoyaniye nauchnykh osnov fundamentostroyeniya* [The Current State of the Scientific Foundations of Foundation Engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1967.

Received 6 December 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ивашенко, Ю.А. О лавинообразном разрушении грунтового основания / Ю.А. Ивашенко, Е.Н. Серебренникова, А.Ж. Урумбаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 63–79. DOI: 10.14529/build220107

FOR CITATION

Ivashenko Yu.A., Serebrennikova E.N., Urumbaev A.Zh. On the Avalanche-Like Destruction of Soil Base. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022, vol. 22, no. 1, pp. 63–79. (in Russ.). DOI: 10.14529/build220107