

УДК 624.131

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧЕРТАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ПОТЕРЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВОГО АНИЗОТРОПНОГО ОСНОВАНИЯ РАСПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Н.Н. ВИШНЯКОВ**

*(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты лабораторных экспериментов по изучению очертания поверхности скольжения в лабораторном лотке при моделировании работы грунтового основания распорных сооружений. Проведены исследования для различных вариантов напластования грунтов: однородное и анизотропное сложение. Однородное основание моделировалось песком средним, уложенным с уплотнением в лабораторный лоток. Моделирование анизотропного напластования проводилось с помощью чередования слоев песка среднего и прослоек бентонитовой глины. Испытания проводились до полной потери несущей способности грунтового основания. Сделаны выводы об очертании поверхности скольжения при всех вариантах моделирования основания.*

**Ключевые слова:** распорные сооружения, анизотропное основание, несущая способность.

**Введение.** Архитектурно-планировочные решения современных зданий и сооружений общественного и производственного назначения основываются, как правило, на применении большепролетных конструкций перекрытия в виде арочных систем, оболочек и т.п. В этом случае на фундаментах и на грунтах основания помимо вертикальных нагрузок могут действовать горизонтальные нагрузки (распор), которые могут привести к потере устойчивости основания, даже если вертикальное давление меньше расчетного сопротивления грунта. Еще одна большая область применения фундаментов, работающих на совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок – это сооружения животноводческого комплекса с применением железобетонных или стальных полурам, работающих по схеме трехшарнирных арок. В таких конструкциях величина горизонтального распора составляет практически 70% от значения вертикальной нагрузки [1].

Согласно действующим нормативным документам, расчет оснований фундаментов, на которые передаются значительные горизонтальные усилия, обязательно проводится по первой группе предельных состояний. Существуют различные методы расчета, как аналитические, так и основанные на теории предельного напряженно-деформируемого состояния грунтов. Однако самым широко используемым методом, сочетающим в себе относительно небольшую трудоемкость расчетов и достаточную точность, является метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Как показано в [2; 3], данный метод позволяет учесть как неоднородность основания, так и анизотропию прочностных свойств грунтов.

Ярким примером анизотропных грунтов являются ленточные глины, широко распространенные на севере Беларуси [4; 5]. А в целом, многочисленными исследованиями доказано, что большинство грунтов обладает анизотропией прочностных свойств грунтов [1; 6].

Возможность учета такой особенности грунтов, как анизотропия прочностных свойств, позволяет повысить точность расчета несущей способности основания фундаментов. С учетом анизотропии несущая способность, как правило, становится выше [7; 8], что позволяет при новом строительстве принять меньшими размеры или глубину заложения фундамента, тем самым уменьшить стоимость работ как нулевого цикла, так и сметную стоимость здания или сооружения в целом. На этапе, например, обследования фундаментов здания в случае, когда планируется увеличение на них нагрузки, расчет с учетом анизотропии прочностных свойств может обосновать достаточную несущую способность и позволить отказаться от усиления фундаментов здания, что также может дать возможность сэкономить значительные денежные средства.

Если при использовании метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения для однородных оснований круглоцилиндрическое очертание поверхности скольжения было подтверждено многочисленными исследованиями и практическими наблюдениями, то для анизотропного основания такие работы не выполнялись. Исследованию этой проблемы и посвящена данная статья.

Цель работы состоит в получении опытного очертания поверхностей скольжения при потере несущей способности грунтового однородного и анизотропного оснований распорных сооружений при моделировании в лабораторном лотке.

**Основная часть.** *Методика проводимых испытаний, с описанием конструкции лотка.*

Испытания проводились в лотке размером 1,5×1,0×0,35 м, сваренного из металлических уголков и труб, фронтальная сторона которого оснащена оргстеклом толщиной 12 мм, позволяющим наблюдать характер деформирования и образования поверхности скольжения в моделируемом грунтовом основании.

В качестве модели фундамента была взята металлическая пластина размером 30×30 см. Для приложения нагрузки под углом использовался треугольный клин. На клин устанавливался гидравлический домкрат в сборе с маслостанцией. Маслостанция оборудована манометром, служащим для измерения давления. Фиксация величины горизонтальных и вертикальных перемещений осуществлялась при помощи прогибомеров 6ПАО. Схема испытательной установки показана на рисунке 1.

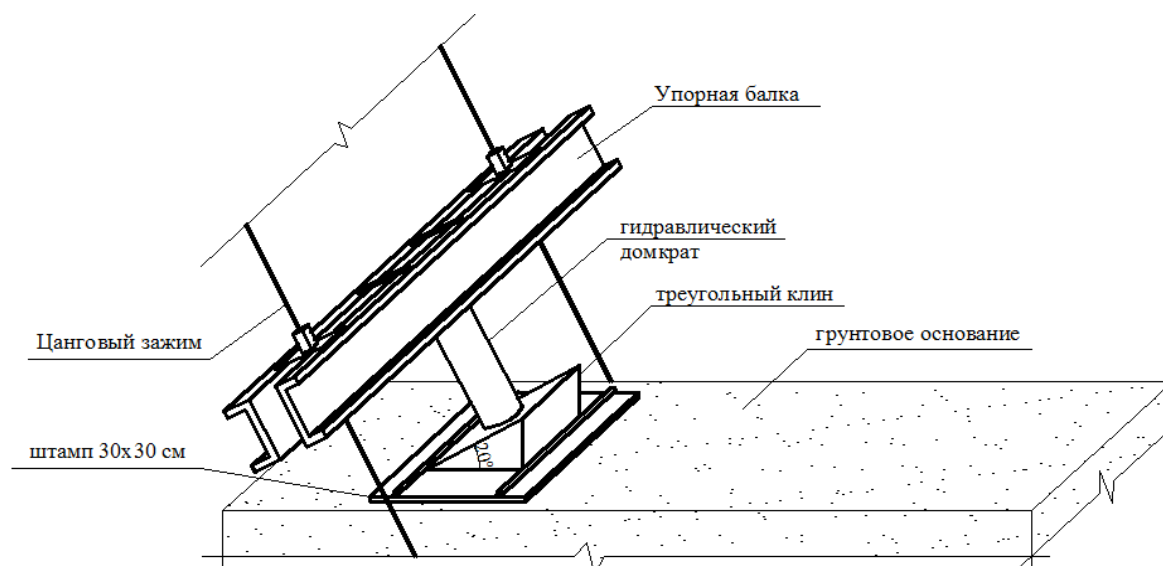


Рисунок 1. – Схема испытательной установки

Нагрузка на штамп прикладывалась как равнодействующая из вертикальных и горизонтальных усилий. На первом этапе были проведены испытания для нагрузок, приложенных под следующими углами: 30°, 25°, 20°, 15°. При этом фиксировался только объем грунта, задействованный в образовании призмы выпора. Было установлено, что наиболее оптимальный угол приложения нагрузки составляет 20°. При принятых размерах лотка и размере штампа данный угол позволяет наблюдать наиболее полную картину потери устойчивости основания.

На втором этапе, при фиксированном угле приложения нагрузки 20°, были проведены испытания для однородного и анизотропного грунтовых оснований.

Нагрузка на штамп передавалась ступенями с шагом 2,5 кН. Каждая ступень нагружения выдерживалась до наступления условной стабилизации. При этом фиксировались вертикальные и горизонтальные перемещения штампа.

Испытание продолжалось до полной потери устойчивости модели фундамента с образованием поверхности сдвига грунта и поверхностного выпора.

*Испытания с однородным песчаным основанием.* Отсыпка однородного песчаного основания осуществлялась песком средним. Для визуализации процесса деформирования грунтового основания были сделаны индикаторные полоски с применением доломитовой муки. Полоски создавались только возле оргстекла, толщина отсыпки 0,5 см, с шагом 3 см по вертикали. Для обеспечения однородности основания грунт уплотнялся вручную, при помощи трамбовки послойно.

В ходе эксперимента на 5 и 7,5 кН наблюдалось образование ярко выраженной фигуры в форме клина под подошвой штампа, после чего были видны значительные горизонтальные перемещения, и на 12,5 кН произошла потеря устойчивости основания (рисунок 2).



Рисунок 2. – Потеря устойчивости однородного песчаного основания

Обобщенные результаты испытания приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты испытаний однородного песчаного основания

Нагрузка на штамп, кН	Горизонтальное перемещение штампа, мм	Вертикальное перемещение штампа, мм	Примечания
2,5	6,58	12,30	Уплотнение грунта под подошвой штампа
5,0	21,55	30,92	Формирование уплотненным грунтом клина
7,5	33,18	46,31	Ярко выраженная фигура в форме клина под подошвой штампа
10,0	52,72	67,49	Значительные перемещения штампа
12,5	108,16	141,43	Потеря устойчивости основания

В результате испытаний, проведенных с однородным песчаным основанием, потеря устойчивости произошла при нагрузке на штамп 12,5 кН. Очертание поверхности скольжения оказалось близким к круглоцилиндрическому.

*Испытания с анизотропным песчано-глинистым основанием.* Модель анизотропного грунтового основания создавалась из двух материалов: средний песок и прослойки бентонитовой глины.

Используемая в работе бентонитовая глина представляет собой материал природного происхождения, основной составляющей которого является монтмориллонит, благодаря которому она приобретает свойства гидрофильности и разбухания.

Прочность на сдвиг прослоек из бентонитовой глины во много раз меньше прочности прослоек из песка среднего, что позволяет моделировать анизотропию прочностных свойств, например, таких грунтов как ленточные глины, где прослойки песка пылеватого имеют меньшую прочность, чем прослойки глины.

Проведено 2 варианта моделирования анизотропного основания:

- в первом случае утаивались прослойки бентонитовой глины толщиной 2,5 см через каждые 8 см песка;
- во втором случае – 0,5 см бентонитовой глины через 4 см песка.

Грунт, как и в случае с однородным основанием, уплотнялся вручную при помощи трамбовки.

Характер деформирования анизотропного основания отличался от изотропного. Потеря устойчивости основания произошла при существенно меньшей нагрузке на штамп – всего 2,5 кН – и сопровождалась сдвигом уплотненного грунтового ядра под штампом по четко видимой поверхности скольжения, близкой к круглоцилиндрической, и поверхностным выпором грунта. При этом сдвиг произошел по прослойке бентонитовой глины, как только нижняя граница уплотненного ядра дошла до прослойки (рисунок 3).

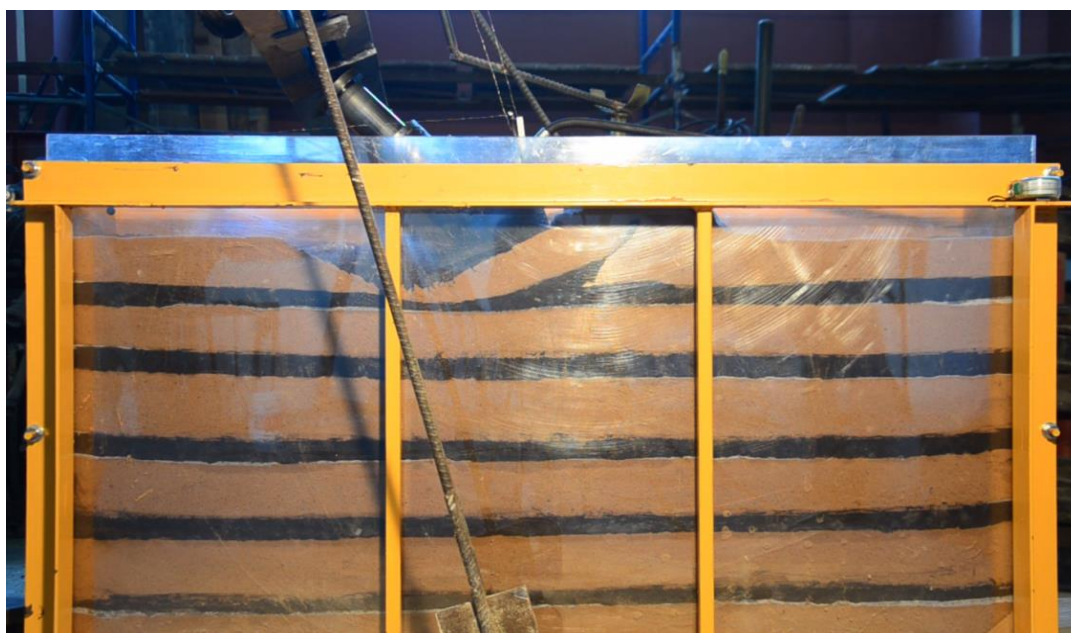


Рисунок 3. – Потеря устойчивости песчано-глинистого основания с прослойками глины по 2,5 см

Повторив эксперимент с более тонкими прослойками глины, толщиной 0,5 см, наглядно видно, что характер потери устойчивости основания аналогичен сдвигу основания с более толстыми прослойками, только сдвиг произошел на большей глубине (рисунок 4). Результаты эксперимента с прослойками глины толщиной 0,5 см представлены в таблице 2.

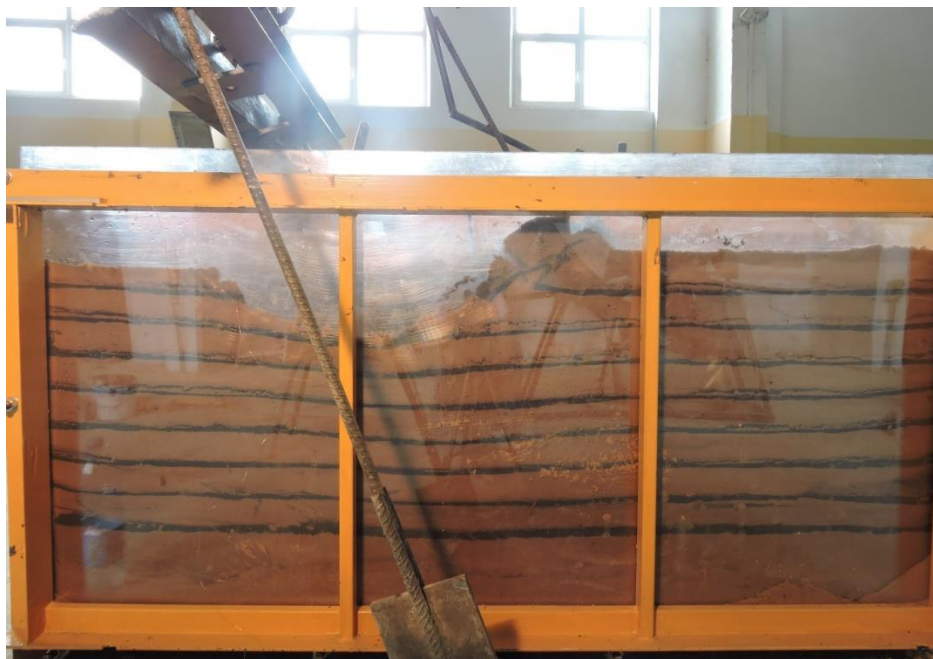


Рисунок 4. - Потеря устойчивости песчано-глинистого основания с прослойками глины по 0,5 см

Таблица 2. – Результаты испытаний песчано-глинистого основания с прослойками глины по 0,5 см

Нагрузка на штамп, кН	Горизонтальное перемещение, мм	Вертикальное перемещение, мм	Примечания
2,5	4,68	0,54	Уплотнение грунта под подошвой штампа
3,0	54,47	0,92	Значительные горизонтальные перемещения штампа
3,5	79,85	3,58	Потеря устойчивости грунтового основания

В ходе анализа очертания поверхностей скольжения установлено, что в целом сдвиг одной части грунта относительно другой произошел по поверхности, близкой к круглоцилиндрической (рисунок 5).

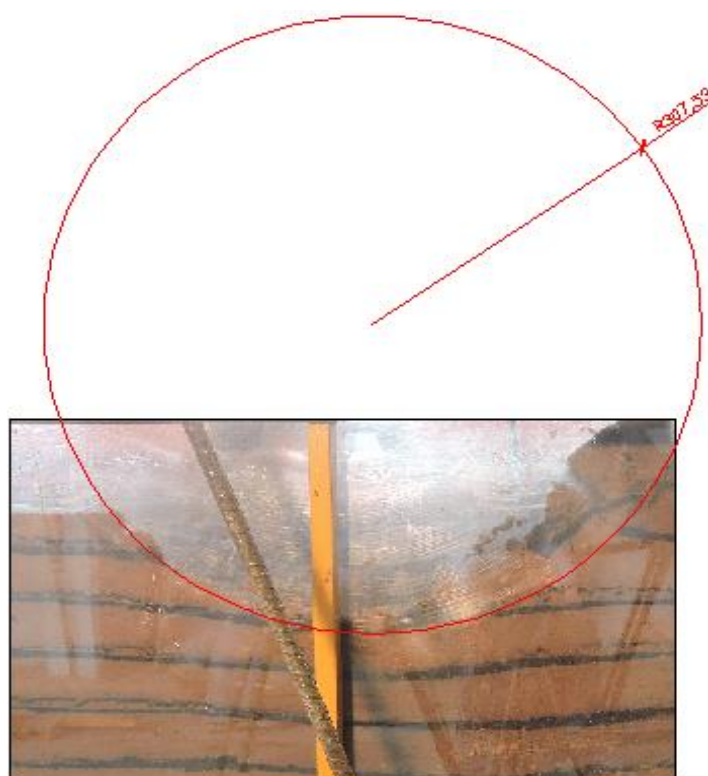


Рисунок 5. – Аппроксимация поверхности скольжения круглоцилиндрической поверхностью

**Заключение.** Лабораторные исследования моделей грунтового основания в лотковых условиях показали, что потеря устойчивости массива грунта с выраженной горизонтальной анизотропией при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок происходит по поверхности, близкой к круглоцилиндрической. При этом необходимо отметить, что поверхность скольжения в основании с выраженной анизотропией первоначально формируется по слабой прослойке. В первом случае поверхность скольжения сформировалась в верхнем слабом слое, во втором случае – во втором. По отношению к слабым прослойкам круглоцилиндрическая поверхность скольжения и в первом, и во втором случае проходила по касательной.

Результаты проведенных исследований подтверждают возможность использования при оценке несущей способности фундаментов распорных сооружений метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения, в том числе для анизотропных оснований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бугров, А.К. Анизотропные грунты и основания сооружений / А.К. Бугров, А.И. Голубев. – СПб. : Недра, 1993. – 245 с.
2. Кремнев, А.П. Определение наиболее опасной поверхности скольжения при расчете устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения / А.П. Кремнев, Д.О. Глухов, Н.Н. Вишняков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2011. – № 8. – С. 37–41.
3. Кремнёв, А.П. Учет влияния анизотропии прочностных свойств грунтов на несущую способность фундаментов распорных сооружений / А.П. Кремнёв, Н.Н. Вишняков // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. / СПбГАСУ ; редкол.: Р.А. Мангушев (отв. ред.) [и др.]. – СПб., 2017. – С. 130–134.
4. Kremniou, A. Anisotropy of the Strength Properties of Clays of the North of Belarus / A. Kremniou, N. Vishniakov // Historical experience and challenges of geotechnical problems in Baltic Sea region : 13th Baltic Sea Region Geotechnical Conference, Vilnius, 22–24 September 2016. – Vilnius, 2016. – P. 114–117.
5. Павловская, И.Э. Полоцкий ледниково-озерный бассейн: строение, рельеф, история развития / И.Э. Павловская. – Минск : Наука і тэхніка, 1994. – 128 с.
6. Zhao, J. The interplay between anisotropy and strain localisation in granular soils: a multiscale insight / J. Zhao, N. Guo // Geotechnique. – 2015. – Vol. 65, iss. 8. – P. 642–656.
7. Wang, B. Influence of the anisotropy of a transversely isotropic foundation on additional stress fields, Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban) / B. Wang, H. Xiao, Y. Dang, L. Sun // J. of Sichuan University (Engineering Science Edition). – 2015.
8. Коробова, О.А. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния анизотропных грунтов и грунтовых оснований / О.А. Коробова // Ползуновский альманах. – 2001. – № 1–2. – С. 52–60.

Поступила 06.12.2021

#### INVESTIGATION OF THE OUTLINE OF A SLIDING SURFACE WITH A LOSS OF BEARING CAPACITY OF AN ANISOTROPIC SOIL FOUNDATION OF SPACER STRUCTURES

N. VISHNYAKOV

*Presented are the results of laboratory experiments on the study of the outlines of the sliding surface in the laboratory chute when simulating the operation of the soil foundation of the spacer structures. Research has been carried out for various variants of soil strata: homogeneous and anisotropic composition. A homogeneous base was modeled with medium sand placed with compaction in a laboratory tray. Modeling of anisotropic bedding was carried out using alternating layers of middle sand and interlayers of bentonite clay. The tests were carried out until the complete loss of the bearing capacity of the subgrade. Conclusions are drawn about the outline of the sliding surface for all variants of modeling the base.*

**Keywords:** spacer structures, anisotropic base, bearing capacity.