

РОЛЬ КРИТИЧЕСКОГО УСКОРЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19446884>

к.г.-м.н., доц. Хакимов Г.А., соискатель Таджиходжаева С. Р.

(Ташкентский архитектурно-строительный университет)

тел. (90) 996-62-46 E-mail: gayratxakimov1955@gmail.com

mail.taqu.uz: g.xakimov@taqu.uz

Аннотация

В данной научной статье приведены результаты экспериментальных исследований по изучению роли критического ускорения колебаний лёссовых грунтов в обеспечение сейсмостойкости оснований сооружений, т.е. приведены результаты проведённых экспериментальных исследований по изучению основных внутренних и внешних факторов существенно влияющие на изменение величины критического ускорения колебания лёссового грунта.

Ключевые слова

критическое ускорение, сейсмическое ускорение, лёссовый грунт, глинистый грунт, прочностные характеристики, интенсивность, сейсмическая просадка, плотность, влажность, пригрузка.

1.Введение. Строительства сооружений на просадочных лёссовых и других увлажнённых слабых глинистых грунтах, особенно в сейсмических районах с обеспечением их прочности, устойчивости и надёжной эксплуатацией является одной из сложных проблем современного строительства.

Изучение причин деформаций зданий и сооружений, возведённых на увлажнённых просадочных лёссовых и других слабых глинистых грунтах при сейсмическом воздействии показывает, что неравномерная просадка фундамента и деформации возведённых зданий и сооружений происходят и при минимальном давлении на грунт, а характер деформации конструкции зависит от грунтовых условий и интенсивности сейсмике. Характерным примером этому могут служить последствия Алма-Атинских землетрясений (Казахстан) 1887, 1911 гг. и Газлийских землетрясений (Узбекистан) 1976, 1984

гг., когда полностью оказались разрушенными не только двух этажные панельные и кирпичные дома, но и более лёгкие, в том числе деревянные конструкции, т.е. произошли повреждения зданий и сооружений независимо от удельного давления, передаваемого на основание и мощности активной(сжимаемой)зоны.

Отсюда следуют, что при наличии увлажнённых просадочных и других слабых глинистых грунтов, способных переходить в динамически нарушенное состояние не всегда можно обеспечить прочность и устойчивость сооружений путем расчета их оснований по первому предельному состоянию (по несущей способности).

В связи с этим возникает необходимость разработки нового принципа проектирования, исходя из условий совместной работы всей конструкции в целом с основанием, т.е. с учетом изменение прочностных характеристик грунтов основания, специфики работы конструкции здания. Одним из самых надежных методов, обеспечивающих прочность и устойчивость эксплуатации сооружений, назначением величины расчетного давления на основание и расчета ограничения величины средней осадки и обусловленной величины разности осадок отдельных соседних фундаментов, послужило бы соблюдение условия, когда $\alpha_{крит.} > \alpha_{сейс}$ [где $\alpha_{кр}$, α_c соответственно величины критического (пороговое ускорение, определяемое прочностными характеристиками структуры грунта) и сейсмического ускорений, колебания частиц грунта] во всех точках основания. Здесь α_c , т.е. интенсивность сейсмического колебания служит, как фактором внешнего воздействия, приводящим к нарушению структуры грунтов, точное определение которой имеет весьма принципиальное значение с точки зрения устойчивости возведённых на них сооружений. Значение α_c определяется по карте сейсмомикрорайонирования, составляемой на основе специальных исследований для выяснения приращения балльности по отношению к данным карты сейсмического районирования территории определённой страны. Величина максимального сейсмического ускорения α_c для приближённых расчётов может быть определена по данным С.В.Медведева, установленным для землетрясений с периодами 0,1 – 0,5 с. (табл.1) [1-7].

Таблица 1. Значения сейсмических ускорений по шкале MSK-1964

Сила землетрясений, в	Сейсмическое ускорение, в мм/с ²
-----------------------	---

баллах	
5	$120 < \alpha_c \leq 250$
6	$250 < \alpha_c \leq 500$
7	$500 < \alpha_c \leq 1000$
8	$1000 < \alpha_c \leq 2000$
9	$2000 < \alpha_c \leq 4000$
10	$4000 < \alpha_c \leq 8000$

Каждому виду грунта, в зависимости от его состава, состояния и свойств присуще свое критическое ускорение колебания частиц грунта. Критическим ускорением $\alpha_{\text{крит}}$ большинство авторов называют такое ускорение колебания частиц грунта, при достижении которого грунт находится в состоянии предельного равновесия и достаточно незначительного превышения ускорения против критического, чтобы водонасыщенный грунт перешел в состоянии потери своей динамической устойчивости, т.е. в состояние «разжижения». В результате разжижения происходит падение структурной прочности грунта и развитие значительных пластических деформаций как в грунтах, залегающих в граничных с фундаментом зонах, так и в подфундаментной зоне основания, приводящих к недопустимым деформациям самого сооружения.

Расчёт оснований, сложенных лёссовыми и другими слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами в сейсмических районах может быть произведён с помощью известных формул механики грунтов при обязательном соблюдении условия:

$$\alpha_{\text{крит.}} > \alpha_{\text{сейс.}}$$

где: $\alpha_{\text{сейс.}}$ - максимальное сейсмическое ускорение, действующее на грунтовый массив; $\alpha_{\text{крит.}}$ - критическое ускорение-пороговое ускорение, определяемое прочностными характеристиками структуры грунта.

Если это условие не соблюдается, т.е. при

$$\alpha_{\text{крит.}} < \alpha_{\text{сейс.}}$$

то при оценке несущей способности основания должно быть учтено снижение прочности грунта при колебании.

Требование недопущения процесса уплотнения и развития пластических зон в основании сооружений, очевидно, достигается путём создания условия $\alpha_{\text{крит.}} > \alpha_{\text{сейс.}}$ всех точках грунтового массива. Условия, когда $\alpha_{\text{кр}} > \alpha_{\text{с}}$ можно достигнуть за счет увеличения прочностных характеристик грунтов. Одним из способов увеличения прочностных характеристик грунтов является их уплотнение. Исходя из условий задачи наибольший интерес для наших исследований представляет уплотнение грунтов вибромашинами [1-3].

2. Литературный обзор и методика исследований. С определением критического ускорения колебания грунтов, с целью для оценки сейсмостойкости лёссовых и других слабых глинистых и песчаных грунтов занимались многие учёные, как в нашей страны, так и зарубежом, в частности Э. Базант, Х.Б.Сид, Р.Витман, П.Ортигоза де Пабло, О.А.Савинов, Д.Д.Баркан, Н.Н.Маслов, Ю.Я.Велли, В.А.Ершов, В.А.Флорин, Х.З.Расулов, Ю.Н.Частоедов, С.Сайфиддинов, Г.А.Хакимов и др.

Для оценки возможности динамического нарушения структуры песчаных грунтов критическое ускорение в научной практике, использовалось О.А.Савиновым, Д.Д.Барканом, Н.Н.Масловым и др.

Критическое ускорение за рубежом часто принимался за характеристику динамической устойчивости песчаных грунтов Х.Б.Сидом, Э. Базантом Р.Витманом и др.

Ю.Я.Велли изучая критическое ускорение для связных грунтов, установил важную роль длительности вынужденного колебания, необходимой для ослабления и разрушения связей этих грунтов в условиях колебания. Он в качестве критического ускорения для связных грунтов предлагает принимать такое ускорение колебательного движения, под воздействием которого в течение 5 мин. связный грунт остаётся в покое. По-видимому, в опытах Ю.Я.Велли были использованы глинистые грунты с достаточно высоким значением связности, при разрушении которой потребовалось время в пределах 5 мин.

Х.З.Расуловым, Ю.Н.Частоедовым, С.Сайфиддиновым, Г.А.Хакимовым и др. также проведены исследования по определению критического ускорения для просадочных лёссовых грунтов, которыми установлена основная, а иногда решающая роль связности грунта в длительности, необходимой для проявления разрушения его структуры. В зависимости от прочности связей устанавливается необходимая длительность нарушения структуры грунта при определённой интенсивности сотрясения. Анализ данных наших опытов

показывает, что деформация грунтов (нарушение структуры грунтов) в процессе колебания во многих случаях начинается спустя 5-30 сек. и более с момента приложения динамической нагрузки на грунт, что является характерным признаком для связных грунтов. Это объясняется тем, что при сотрясении лёссового грунта, имеющего некоторую связность между частицами, динамическая нагрузка воспринимается в первую очередь этими связями, для полного нарушения которых необходимо определённое время. Характер изменения связности во времени, очевидно, зависит от физико-химических явлений в грунте, протекающих в процессе колебания. Это обстоятельство подтверждает ранее сделанный вывод об отсутствии деформации грунта в случае, если не нарушаются силы сцепления при колебаниях, т.е. когда критическое ускорение больше чем сейсмическое ускорение [8-15].

Общая устойчивость грунта в динамических условиях и развитие запредельных пластических деформаций в основании под подошвой фундаментов зависит, прежде всего от $\alpha_{кр}$, т. е. от критического ускорения колебания. Поэтому одной из задач экспериментальных исследований являлось изучение влияния различных факторов на величину критического ускорения.

Среди них различают внутренние: состав, состояние и свойства грунтов и внешние: интенсивность колебания и его параметры (длительность, частота, амплитуда), внешняя пригрузка [16-20].

Надо отметить, что критическое ускорение колебания грунта в основном определяется двумя методами: расчётный и лабораторный метод. При определении критического ускорения расчётным методом можно использовать формулу предложенного проф. Х.З.Расуловым [2-3]:

а) для глинистых грунтов

$$\alpha_{кр} = \frac{2\pi g(\sigma_{дин} tg\varphi_w + c_w)}{\gamma_w T_{п} v_{сд}} \quad (1)$$

где,

g - ускорение силы тяжести;

φ_w - угол внутреннего трения грунта при влажности w ;

c_w - сцепление (связность) грунта отвечающее влажности w ;

γ_w - плотность влажного грунта;

T_{Π} - период колебания;

$v_{сд}$ - скорость поперечных сейсмических волн;

б) для песчаных грунтов, т.е. когда $c_w = 0$

$$\alpha_{кр} = \frac{2\pi g \sigma_{дин} t g \varphi_w}{\gamma_w T_{\Pi} v_{сд}} \quad (2)$$

здесь, $\sigma_{дин} = \gamma_w z + P_0$ (где, $\gamma_w z$ –собственный вес перекрывающего горизонт грунта, P_0 - вес сооружения) для случая $P_0 = 0$ и $c_w = 0$, получим

$$\alpha_{кр} = \frac{2\pi g z t g \varphi_w}{T_{\Pi} v_{сд}} \quad (3)$$

а для пластичных лёссовых грунтов

$$\alpha_{кр} = \frac{2\pi g c_w}{\gamma_w T_{\Pi} v_{сд}} \quad (4)$$

Из этих формулы видна, что величина критического ускорения определяется в основном прочностными характеристиками грунта, а при всех прочих равных условиях критическое ускорение уменьшается с ухудшением свойств грунтов.

Пример. Определяем величину критического ускорения для поверхностного слоя пластичного лёссового грунта, характеризующегося следующими данными: сила сцепления (связность) c_w - 0,5 т/м²; $v_{сд}$ – скорость распространения поперечных сейсмических волн - 150 м/с; период колебания $T = 0,2$ с.; плотность влажного грунта - 1,6 т/м³.

Для пластичных грунтов, когда $P_0 = 0$ (здесь P_0 = вес сооружения) критическое ускорение определяется по формулам (4):

$$\alpha_{кр} = \frac{2\pi g c_w}{\gamma_w T_{\Pi} v_{сд}} = \frac{2 \times 3,14 \times 9,81 \times 0,5}{1,6 \times 0,2 \times 150} = 0,641 \text{ м/с}^2 = 641 \text{ мм/с}^2$$

Для определения критического ускорения в лабораторных условиях была использована вибрационная установка с горизонтально-вынужденными колебаниями.

Вибрационная установка позволяет воспроизводить гармонические горизонтально-вынуждённые колебания при амплитуде от 0,1 до 6,0 мм и частоте 1-12 Гц. Параметры вибрации (частота, амплитуда) создаваемая этой экспериментальной вибрационной установкой близко к параметрам сейсмических колебаний. Например, частота разрушительного Ташкентского (Узбекистан) землетрясения 26 апреля 1966 г. составила 10 Гц. [3,5-6].

Плавная регулировка числа оборотов электродвигателя путем изменения напряжения тока в цепи электродвигателя с помощью лабораторного автотрансформатора, позволяет создавать различной интенсивности вибрационные воздействия с учётом амплитуды и частоты колебания. Интенсивность вибрационного воздействия оценивается по формуле гармонического колебания:

$$\alpha = 4\pi^2 f^2 A \quad (5)$$

где, α - ускорение колебания;

f - частота колебания;

A - амплитуда колебания.

На установке можно исследовать грунты, как нарушенной, так и ненарушенной структуры при различных ускорениях колебания. С помощью этой формулой на вибрационной установке можем создавать любую значению сейсмического ускорения.

Для выполнения лишь предварительных расчётов допускается использование значения сейсмического ускорения, приведённого в табл.1.

Критическое ускорение грунта предопределяет его динамическую устойчивости. Когда действующие внешние динамические (сейсмические) ускорение преодолевает критическую ускорение, нарушается динамическая устойчивость грунта, т.е. нарушается (разрушается) структура грунта и грунт деформируются (уплотняются) [21-25].

Величины критических ускорений колебаний грунта изменяется в зависимости от многих внутренних факторов, как состава (гранулометрический, минералогический, химический), состояние

(плотности-влажности), свойств (механический) грунтов и внешних факторов, как интенсивности колебания и его параметров (длительности, частоты, амплитуды) [26-32].

3. Анализы и результаты. Рассмотрим результаты экспериментальных исследований по изучению зависимости критического ускорения колебания от различных факторов в условиях сотрясения.

Влияние пригрузки на изменение критического ускорения. Исследованиями Н.Н.Маслова, П.Л.Иванова, В.А.Ершова, Х.Б.Сида, Х.З.Расулова и др. установлено, что критическое ускорение тесно связано с воздействием на толщу нормальных напряжений, причём эта зависимость имеет линейный характер, и хорошо описываемой эмпирической формулой, предложенной Н.Н.Масловым:

$$\alpha_{кр} = \alpha_{кр}^o + aP_o$$

где, $\alpha_{кр}^o$ – величина критического ускорения при отсутствии внешней пригрузки;

a – коэффициент, зависящий от прочностных характеристик грунта;

P_o – внешняя пригрузка.

На рис.1 графически иллюстрирована зависимость $\alpha_{кр}$ от внешней пригрузки. Как показывают такого рода графики с ростом пригрузки увеличивается критическое ускорение, т.е. между ними существует линейная связь.

При повышении давления от 0,1 до 0,4 МПа на идентичных образцах близнецах грунта критическое ускорение увеличилось от 500-700 мм/с² до 950-1050 мм/с², т.е. более 1,5 раза. С увеличением нагрузки диапазон критических ускорений уменьшается, стремясь к постоянной величине, что по-видимому, связано с увеличением плотности грунта при уплотнении.

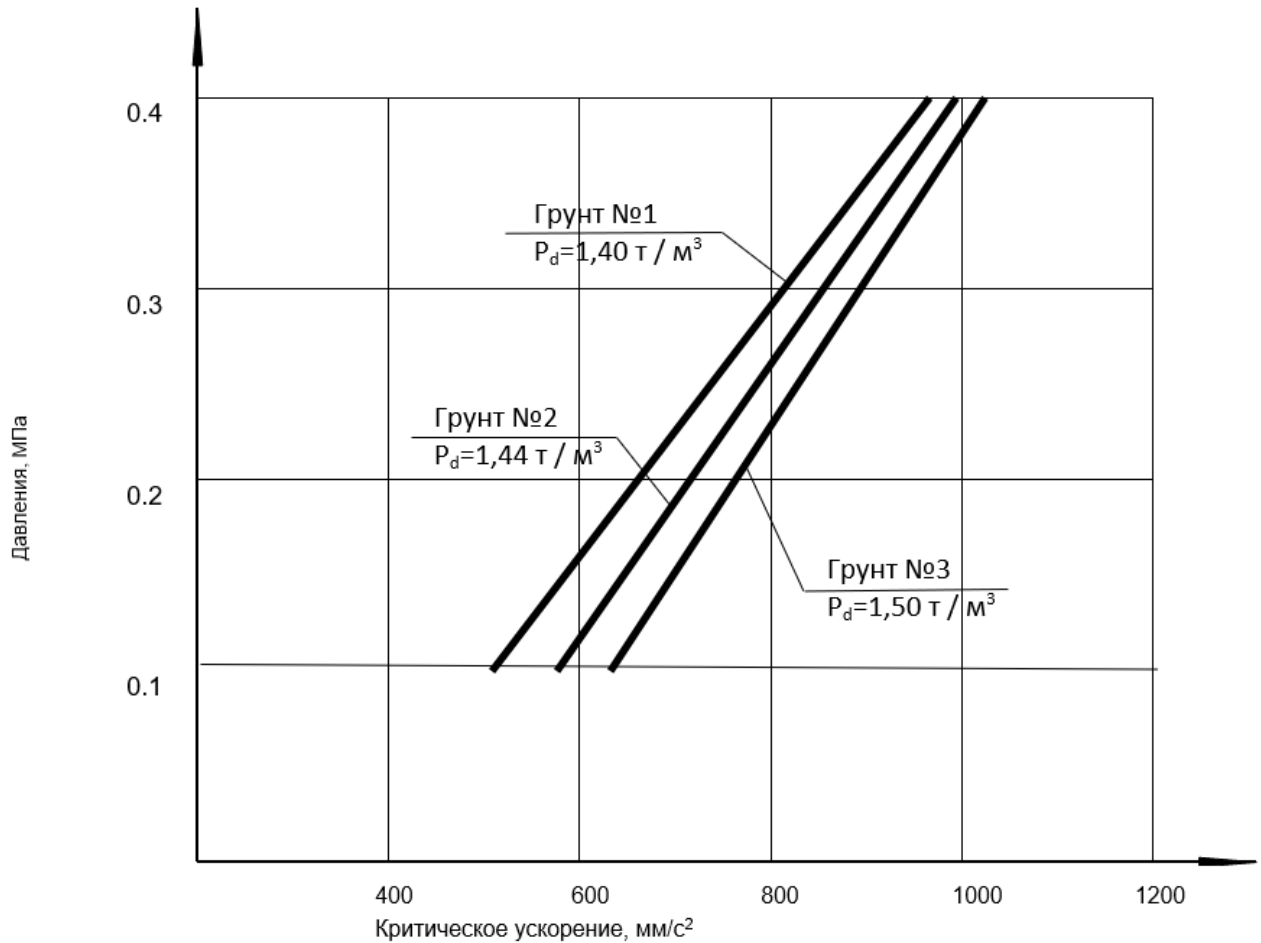


Рис.1 Влияние пригрузки на изменение критического ускорения лёссовых грунтов

Влияние собственного веса грунта на изменение критического ускорения. Многие специалисты, в частности П.Л.Иванов, Н.Н.Маслов, В.А.Флорин, А.А.Ничипорович (Россия), Х.З.Расулов, Ю.Н.Частоедов(Узбекистан) и др. изучали влияние собственного веса толщи на устойчивость грунтов. Проводив исследование с несвязными грунтами П.Л.Иванов отмечал, что начальное напряжённое состояние, т.е. состояние, обусловленное собственным весом толщи имеет больше значение в обеспечении устойчивости водонасыщенных песчаных масс, находящихся под динамическим воздействием. Напряжённое состояние, возникающее в толще от её собственного веса, благотворно влияет на глубину распространения зоны, где грунт теряет свою устойчивость. Учитывая результатов выше приведённых исследований П.Л.Иванов пришёл к такому выводу, что степень устойчивости водонасыщенных песчаных грунтов на той

или иной глубине при заданной интенсивности динамического воздействия определяется величиной собственного веса грунта.

Н.Н.Маслов (Россия) установил ограниченную роль собственного веса водонасыщенной песчаной толщи в степени её динамической устойчивости.

Х.З.Расуловым (Узбекистан) были проведены многочисленные опыты с различными песчаными грунтами с целью изучения влияния собственного веса грунта на значение критического ускорения. Он отметил, что собственный вес толщи водонасыщенных грунтов при приложении динамической нагрузки оказывает положительное влияние, повышая его динамическую устойчивость. Но в процессе динамического воздействия на толщу водонасыщенного грунта снижается значение собственного веса, как фактора, повышающего динамическую устойчивость. Снижение значение собственного веса грунта подтверждает процесс, протекающий в водонасыщенной грунтовой толще в условиях динамического воздействия на неё: постепенное нарушение структуры грунта при сотрясении; сдвиг грунтовых зерен вниз под влиянием собственного веса в условиях нарушения между частичных контактов; возникновение в толще и последовательное нарастание избыточных давлений (динамического напора) во времени до максимально возможных для данного горизонта величин; последовательное во времени заглубление активной зоны с одновременным снижением значения критического ускорения в нижних горизонтах, т.е. явлением послойного разжижения.

Учитывая выше приведённых можно отметить, что собственный вес водонасыщенных грунтов положительно влияет на критическое ускорение в момент приложения динамической нагрузки, а в дальнейшем его влияние будет зависит от длительности сотрясения.

Влияние плотности грунта на изменение критического ускорения. На рис.2 приведён график зависимости критического ускорения $\alpha_{кр}$ от плотности сухого лёссовидного грунта в виде $\alpha_{кр} = \varphi(\rho_d)$. Для образца суглинка, имеющего 18-процентную влажность и нагрузку $P = 0,075$ МПа при плотности сухого грунта $\rho_d = 1,40$ Т/М³, критическое ускорение равно примерно 1000 мм/с²; при $\rho_d = 1,45$ Т/М³ ускорение равно 1250 мм/с², а при плотности $\rho_d = 1,60$ Т/М³ критическое ускорение равно 3000 мм/с² и т.д., т.е. критическое ускорение увеличивалось в 3 раза.

Таким образом, можно сделать заключение, что с увеличением плотности сухого грунта при прочих равных условиях величина критического ускорения возрастает. Это по-видимому, связано с увеличением сцепления грунта при повышении их плотности, так как сцепление в рыхлых увлажнённых лёссовых разновидностях характеризуется небольшим значением и может сравнительно легко и быстро нарушаться при сотрясении, обеспечив тем самым интенсивное уплотнение грунта, а для нарушения сцепления плотных грунтов требуется большая интенсивность колебательного движения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что критическое ускорение непостоянно и зависит от плотности.

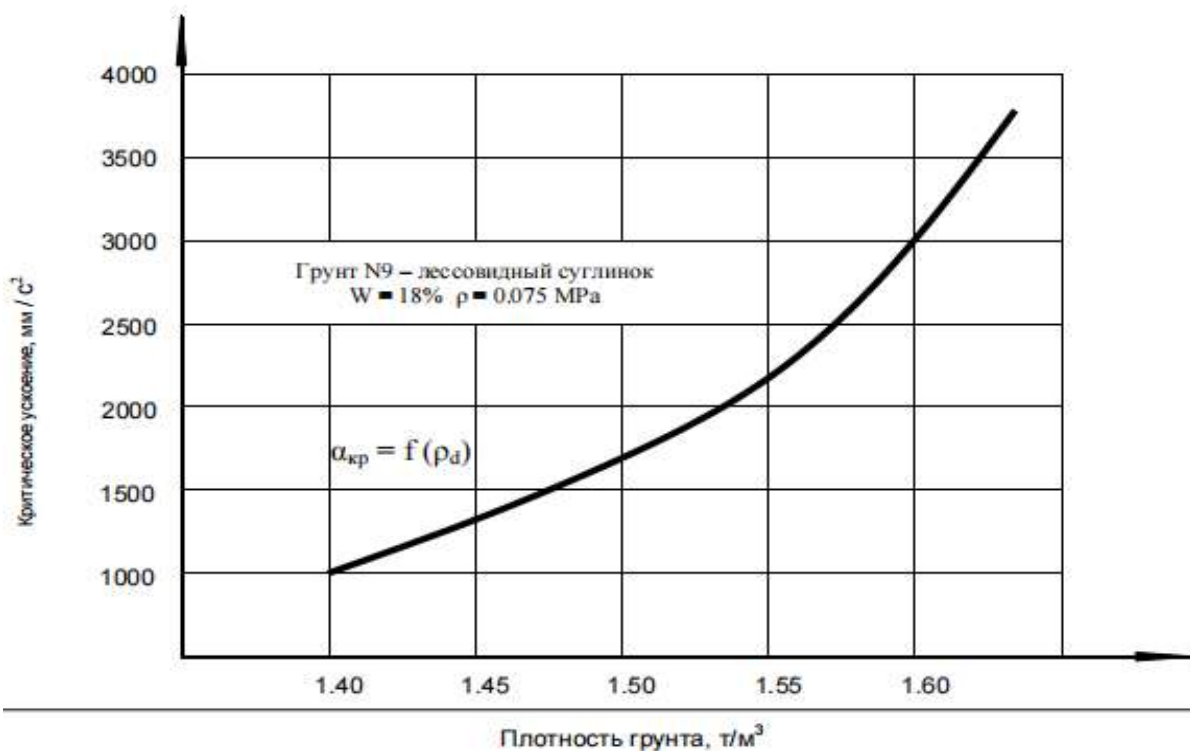


Рис.2 Влияние плотности сухого лёссового грунтов на изменение критического ускорения грунта

Влияние скорости распространения сейсмических волн на изменение критического ускорения. Как показали обследование последствий многих разрушительных землетрясений в пределах одной и той же сейсмической зоны количество и характер повреждений зданий и сооружений различны на разных грунтах, что в значительной степени объясняется различием характера колебаний за счёт существенного отличия скорости распространения волн. Колебания вызванных землетрясением, и скорость их

волн зависят в значительной мере от упругих свойств среды, по которой распространяются

волны.

В динамических(сейсмических)условиях на грунтовой толще действуют различные колебания. Среди них для грунтов наиболее опасным считается горизонтальные колебания, которые могут возникать от продольных и поперечных волн, но чаще наиболее интенсивны колебания от прямой горизонтально поляризованной поперечной волны. Частицы грунта при продольной волне колеблются в направлении распространения волны, а при поперечной волне, частицы грунта колеблются перпендикулярно направлению распространения волн.

Многие специалисты, в частности Н.Д.Красников (Россия) отмечает, что величина скорости распространения волн в грунтах зависит от их состояния, что весьма важно особенно применительно к увлажнённым лёссовым грунтам.

При всех прочих равных условиях с увеличением влажности грунта увеличивается значения скорости сейсмических волн, а также уменьшается прочностные характеристики грунта и это приведёт к резкому снижению величины критического ускорения.

Исследования Н.Д.Красникова также показали, что величина скорости сейсмических волн существенно зависит и от напряжённого состояния грунтов, т.е. с увеличением давление на грунт увеличивается скорости распространение сейсмических волн.

Влияние влажности грунта на изменение критического ускорения. влажность лёссового грунта. В ходе эксперимента испытуемым образцам грунта придавалась различная влажность путём искусственного их замачивания. При влажности менее 10% даже при ускорениях колебания в 5000 мм/с^2 , что превышает значения максимальных сейсмических ускорений колебания при 9 балльном сейсмическом воздействии нарушение структуры грунта не происходило, каких-либо вертикальных деформаций грунт не испытывал. При достижении влажности 18-20% происходило резкое снижение величины критического ускорения. Это объясняется ослаблением связности (понижением прочности) пород при повышении влажности. Известно, что дополнительное насыщение водой породы всегда сопровождается вспучиванием грунта, связанное с утолщением водных оболочек частиц. Частицы грунта при этом отодвигаются друг от друга,

выходя из зон молекулярного притяжения, ослабляя силы связности между частицами. Сила притяжения воды к частице зависит в свою очередь от толщины водных оболочек, с увеличением которой уменьшается сила молекулярного притяжения. Это обстоятельство свидетельствует о сравнительно лёгком нарушении структуры лёссовых грунтов и снижении величины критического ускорения при повышении влажности. Это снижение продолжается до степени влажности $S_r = 0,8$ и далее величина критического ускорения стремится к постоянной величине, что хорошо усматривается из графика приведённого на рис.3.

Отсюда следует, что потеря динамической устойчивости исследованных грунтов наиболее интенсивно происходит в интервале влажности от оптимальной до водонасыщения.

Как показали результаты лабораторных экспериментальных исследований критическое ускорение колебания лёссового грунта увеличивается с увеличением внешней пригрузки, плотности и связности грунта. Критическое ускорение уменьшается с увеличением влажности, пористости грунта и прочие.

Критическое ускорение увлажнённого лёссового грунта также зависит от длительности колебания. В длительных колебаниях за счёт снижения прочностных характеристик грунта уменьшается критическое ускорение.

На изменение величины критического ускорения в определённой степени влияет и характер динамического колебания (по амплитуды и частоты). Как известно, что для оснований зданий и сооружений наиболее опасны, с точки зрения нарушения динамической устойчивости высокочастотные землетрясения.

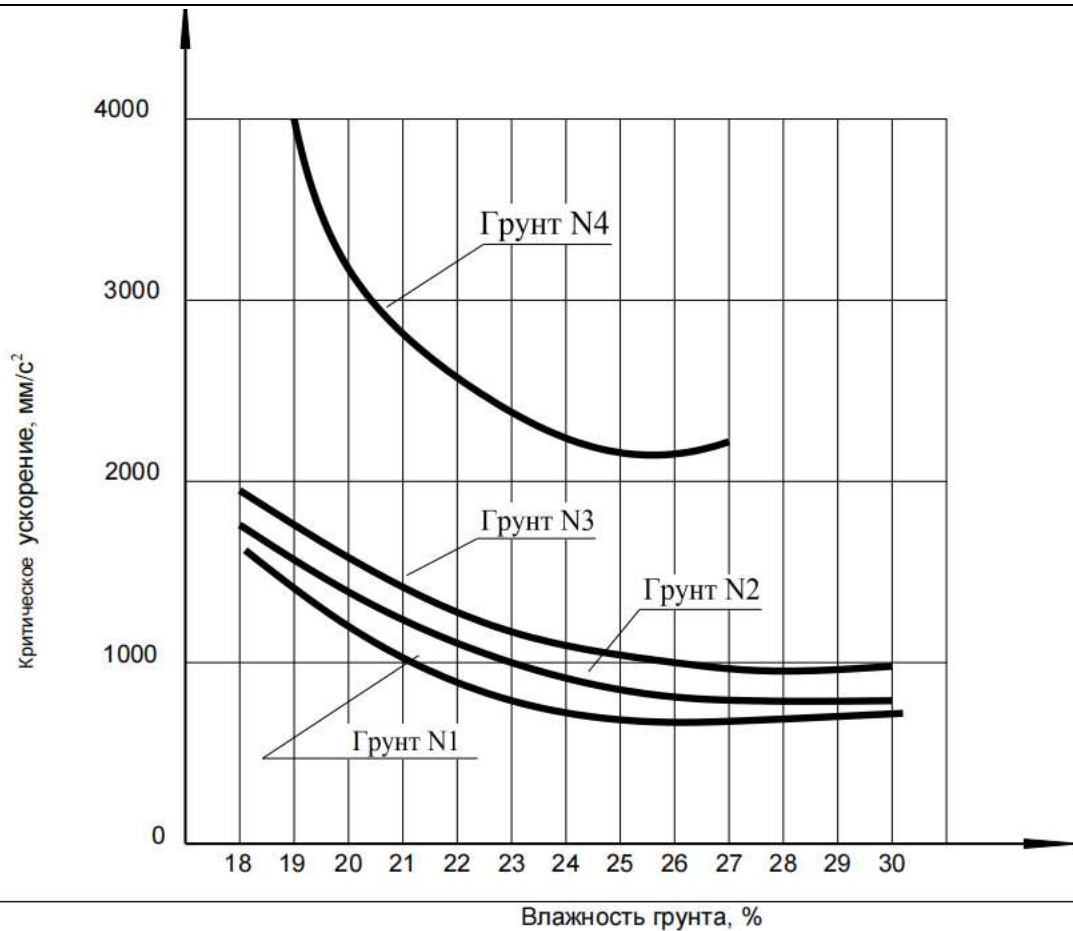


Рис.3 Влияние влажности лёссовых грунтов на изменение критического ускорения грунтов

4. Заключение и рекомендации. 1. Сейсмостойкость оснований зданий и сооружений, т.е. общая устойчивость грунта в сейсмических условиях и развитие запредельных пластических деформаций в основании под подошвой фундаментов зависит прежде всего от критического (порогового) ускорения колебания грунта.

2. Снижение прочностных показателей увлажнённого лёссового грунта, угла внутреннего трения и связности (сцепления) при колебаниях с ускорением, превышающим критическое значение безусловно. Но при этом, особо отмечается изменение силы связности, которое носит интенсивный характер в процессе колебаний.

3. Критическое ускорение грунта с ослаблением прочностных характеристик грунта при колебании (в зависимости от различных внутренних и внешних факторов) пропорционально снижается. Это приведёт к снижению общей устойчивости оснований, а также к неравномерным деформациям зданий и сооружений.

4. С увеличением активно действующего ускорения на грунт повышается степень разрушения структуры (связности) увлажнённого лёссового грунта.

5. Также, на изменение величины критического ускорения в определённой степени влияет интенсивность, длительность и характер динамического колебания (по амплитуды и частоты). Для оснований зданий и сооружений наиболее опасны, с точки зрения нарушения динамической устойчивости высокочастотные землетрясения. В длительных колебаниях за счёт снижения прочностных характеристик грунта уменьшается критическое ускорение.

6. Наблюдались возрастание во времени прочностных характеристик (особенно за счёт связности) предварительно вибрированных увлажнённых лёссовых грунтов. Особенно большой эффект достигается в таких условиях при воздействии на грунт высокочастотных колебаний. При высокочастотных динамических воздействиях структура грунта легко нарушается, грунт эффективно уплотняется и повышается критическое ускорение грунта. При подготовке рекомендации по виброуплотнению лёссовых грунтов можно использовать этих выводов.

7. Нарушение структуры и разжижение увлажнённых лёссовых грунтов под влиянием динамических (сейсмических) сил происходит далеко не во всех случаях, а лишь после преодоления критического ускорения действующим динамическим (сейсмическим) ускорением. После преодоления действующим динамическим (сейсмическим) ускорением некоторого критического ускорения происходит резкое снижение прочностных характеристик грунтов и это приведёт к неравномерным деформациям сооружений. Эти деформации оснований при землетрясениях в большинстве случаев определяет степень разрушения сооружений. Когда критическое ускорение больше, чем сейсмическое ускорение лёссовый грунт сохраняет свою структуру. А когда критическое ускорение меньше, чем сейсмическое ускорение структура лёссовых грунтов нарушается и грунт переходит в разжижённое состояние.

8. Возможность снижения величины критического ускорения с повышением влажности грунта в процессе колебания. Так как, при повышении влажности легко нарушается структура грунта, а критическое ускорение снижается и это наиболее интенсивно происходит в интервале влажности от оптимальной до водонасыщения, а далее величина критического ускорения стремится к постоянной величине.

9. Возможность снижения величины критического ускорения падением роли пригрузки в процессе колебания.

10. Любое заглубление зданий и сооружений повлечёт за собой повышение значения критического ускорения и соответственно его устойчивости. Однако необходимо отметить, что возникновение динамического напора в граничных с фундаментом зонах, выше его подошвы, сразу же может снизить эффект заглубления и величину критического ускорения. Роль пригрузки как фактора, повышающего динамическую устойчивость грунта, с глубиной снижается.

11. Собственный вес водонасыщенных грунтов положительно влияет на критическое ускорение в момент приложения динамической нагрузки, а в дальнейшем его влияние будет зависеть от длительности сотрясения.

12. С ростом безинерционной пригрузки критическое ускорение увеличивается. С повышением пригрузки увеличивается статическая прочность грунтов. Сейсмостойкость грунта в линейной зависимости увеличивается со значением нормальных напряжений от пригрузки. А при длительных колебаниях грунт переходит в разжижённое состояние (при разжижении грунт полностью теряет свою прочность и устойчивость) и пригрузка в этих условиях отрицательно влияет на динамическую устойчивость грунта, т.е. тяжёлые сооружения при длительных землетрясениях могут вытапливаться в разжижённый грунт (Например, при 10 балльном землетрясении по шкале MSK-64, в Индии в 1936 г. большинство сооружений полностью погрузилось в разжижённый грунт).

13. Как показали результаты наших экспериментальных исследований, что критическое ускорение лёссового и глинистого грунта увеличивается с увеличением прочностных характеристик грунта (в основном за счёт связности грунта, т.е. увеличивается с увеличением число пластичности грунта).

14. С увеличением плотности сухого грунта при прочих равных условиях величина критического ускорения возрастает. Это по-видимому, связано с увеличением сцепления грунта при повышении их плотности, так как сцепление в рыхлых увлажнённых лёссовых разновидностях характеризуется небольшим значением и может сравнительно легко и быстро нарушаться при сотрясении, обеспечив тем самым интенсивное уплотнение грунта, а для нарушения сцепления плотных грунтов требуется большая интенсивность колебательного движения. Эти результаты свидетельствуют о том, что критическое ускорение также зависит от плотности.

15. Величина скорости распространения волн в грунтах зависит от их состояния, что весьма важно особенно применительно к увлажнённым лёссовым грунтам. Отсюда следует, что для определения скорости сейсмических волн необходимо учитывать состояние грунта, а также величину действующего на толщу напряжения. При всех прочих равных условиях, с увлажнением грунта увеличивается скорость сейсмических волн, а также уменьшаются прочностные характеристики грунтов. Это обстоятельство приведёт к резкому снижению величины критического ускорения.

16. Общая прочность и устойчивость грунта в динамических (сейсмических) условиях зависит прежде всего от $\alpha_{кр}$, т.е. от критического ускорения колебания. Условия, когда $\alpha_{кр} > \alpha_c$ можно достигнуть в основном за счёт увеличения прочностных характеристик грунтов.

17. С повышением прочностных характеристик лёссового грунта увеличиваются значения критического ускорения и соответственно коэффициент сейсмической устойчивости, т.е. сейсмическая устойчивость грунтов в основании зданий и сооружений может быть повышена увеличением прочностных характеристик грунтов (угла внутреннего трения и силы сцепления). Одним из способов увеличения прочностных характеристик грунтов является их уплотнение.

18. Из вышеизложенных можно отметить, что высокосейсмических районах при уплотнении грунтов с помощью вибромашины надо уделять особое внимание на частоту вибрации. Как показали наши экспериментальные исследования высокочастотные вибрации положительно влияет на увеличение плотности, прочностных характеристик и связанные с ними критического ускорения грунта. При подготовке рекомендации по виброуплотнению лёссовых грунтов можно использовать этих выводов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Khakimov, G. A. (2020). Changes in the Strength Characteristics of Glinistx Soils under the Influence of Dynamic Forces International Journal of Engineering and Advanced Technology, IJEAT. *Exploring innovation*, 639-643.
2. Khakimov, G. A. (2022). The nature of the change in the connectivity of moistened loess soils during vibration. *American Journal of Applied Science and Technology*, 2(06), 26-41.

3. Расулов Х.З. Сейсмопрочность и сейсмопросадка лессовых грунтов. – Ташкент: Фан, 2020. – 336 с.
4. Khakimov, G. A. CHANGES IN PLASTIC ZONES IN LESS BASES UNDER SEISMIC VIBRATIONS. *Journal of New Zealand*, 742-747.
5. Khakimov, G. A., & Muminov, M. A. (2022). CONSTRUCTION OF BUILDINGS ON WEAK MOIST CLAY SOILS IN SEISMICALLY ACTIVE ZONES OF UZBEKISTAN. *Web of Scientist: International Scientific Research Journal*, 3(12), 755-760.
6. GMFN, D., Kh, S. S., & Muminov, M. M. (2022). DEFORMATION OF MOISTENED LOESS FOUNDATIONS OF BUILDINGS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS.
7. Khajiev, N. M. (2022). CHANGE IN THE CONSISTENCY CHARACTERISTICS OF THE WETTED LUSSIC BASES (GRUNTS) OF BUILDINGS UNDER THE INFLUENCE OF SEISMIC FORCES. *Академические исследования в современной науке*, 1(13), 261-267..
8. Khakimov, G. A., Kh, S. S., Muminov, A. A., Berdimurodov, A. E., & Muminov, J. A. (2023). COMPACTION OF LOESS BASES OF BUILDINGS AND STRUCTURES, AS WELL AS BULK SOILS AROUND THE FOUNDATION USING VIBRATORY ROLLERS IN SEISMIC AREAS. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*, 11(4), 306-311.
9. Gayrat, G. K., Abduraimova, K., Muminov, A., Berdimurodov, A., & Sobirova, Z. (2023). CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN DIFFICULT SOIL CONDITIONS AND SEISMIC REGIONS OF THE REPUBLICS OF CENTRAL ASIA. *International Bulletin of Applied Science and Technology*, 3(6), 315-319.
10. Khakimov, G., Abduraimova, K., Muminov, A., Berdimurodov, A., & Sobirova, Z. (2023). DETERMINATION OF THE CALCULATED (PERMISSIBLE) PRESSURE ON THE LOESS FOUNDATION OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN SEISMIC CONDITIONS. *International Bulletin of Engineering and Technology*, 3(6), 61-66.
11. Khakimov, G., Abduraimova, K., Askarov, M., & Khakimova, M. (2023). INFLUENCE OF HUMIDITY ON CHANGES IN THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF LESS SOILS UNDER SEISMIC INFLUENCE. *International Bulletin of Engineering and Technology*, 3(6), 274-281.
12. Khakimov, G. (2023). FORMATION AND DEVELOPMENT OF SEISMOPROSADOCHNOY DEFORMATION AND UVLAJNYONNYKH

LYOSSOVYKH OSNOVANIYAX ZDANI I SOORUJENI. *International Bulletin of Applied Science and Technology*, 3(6), 1339-1345.

13. Khakimov, G. (2023). CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN DIFFICULT GROUND CONDITIONS AND SEISMIC AREAS. *International Bulletin of Applied Science and Technology*, 3(2), 203-209.

14. ХАКИМОВ, Г. А., МУМИНОВ, М. А., АСКАРОВ, М. Т., & ГЕНЖИБАЕВ, Т. (2023). РАЗВИТИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ В ПОДФУНДАМЕНТНОЙ ЧАСТИ ОСНОВАНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ. *GOLDEN BRAIN*, 1(1), 130-135.

15. Gayrat, G. K., & Abduraimova, K. (2023). INCREASING DAMAGE TO STABILITY OF BUILDINGS ERECTED ON LESS SOILS IN SEISMIC AREAS, DEPENDING ON SOME FACTORS. *International Bulletin of Engineering and Technology*, 3(9), 61-69.

16. Khakimov, G., & Abduraimova, K. (2023). RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON STUDYING THE DEPENDENCE OF THE CRITICAL ACCELERATION OF GROUND VIBRATIONS FROM VARIOUS FACTORS UNDER CONVERSATION CONDITIONS. *International Bulletin of Applied Science and Technology*, 3(10), 330-337.

17. Khakimov, G. A., Kh, S. S., Muminov, A. A., Berdimurodov, A. E., & Muminov, J. A. (2023). Experience of compaction of the bases of large buildings and cores of earthen dams of waterworks in seismic areas with optimal humidity of loess soil. *Academia Science Repository*, 4(04), 365-372.

18. ХАКИМОВ, Г. (2023). Повышение сейсмической устойчивости увлажнённых лёссовых оснований. *Сейсмическая безопасность зданий и сооружений*, 1(1), 170-178.

19. ХАКИМОВ, Г. (2023). Изменение прочностных характеристик виброуплотнённых увлажнённых лёссовых грунтов во времени. *Сейсмическая безопасность зданий и сооружений*, 1(1), 165-170.

20. Rakhmonkulovna, K. G. A. A. K. (2024). INCREASING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF LOESS SOILS OVER TIME AFTER VIBRATION. *Synergy: Cross-Disciplinary Journal of Digital Investigation* (2995-4827), 2(2), 39-44.

21. Akramovich, K. G., Xushvaqtovich, B. S., Abduvakhobjonovich, R. S., Sunnatovich, T. Z., & Zarofatkhan, A. (2024). Investigation of the Patterns of Changes in the Structural Strength of Moistened Loess Soils Under Dynamic (Seismic) Influences. *International Journal of Scientific Trends*, 3(2), 1-9.

22. Akramovich, K. G., Xushvaqtovich, B. S., Abduvakhobjonovich, R. S., Sunnatovich, T. Z., & Zarofatkhan, A. (2024). Problems of Design and Construction of Buildings and Structures in Seismic Areas, on Weak Moistened Clay and Subsidence Loess Bases. *International Journal of Scientific Trends*, 3(2), 19-26.

23. Akramovich, K. G. (2024). THE INFLUENCE OF EXTERNAL LOADING AND THE OWN WEIGHT OF THE SOIL ON THE SEISMIC RESISTANCE OF THE FOUNDATIONS OF STRUCTURES. *Valeology: International Journal of Medical Anthropology and Bioethics* (2995-4924), 2(5), 1-6.

24. Akramovich, K. G. (2024). The Influence of the Frequency of Dynamic Action on the Violation of the Structure and Compaction of Loess Soils. *EUROPEAN JOURNAL OF INNOVATION IN NONFORMAL EDUCATION*, 4(5), 15-19.

25. Akramovich, K. G., & Goyibov, O. (2024). Methods for Determining the Critical Acceleration of Loess Soil Oscillation. *American Journal of Technology Advancement*, 1(5), 31-38.

26. ХАКИМОВ, Г. А., ИСКАНДАРОВА, Э. Б., & БАЙМАТОВА, Ш. Х. (2024). СЕЙСМИЧЕСКИЕ (ДИНАМИЧЕСКИЕ) ПРОСАДКИ В УВЛАЖНЁННЫХ ЛЁССОВЫХ ОСНОВАНИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. *Строительство и образование*, (Спецвыпуск 1), 61-68.

27. ХАКИМОВ, Г. А., ИСКАНДАРОВА, Э. Б., & БАЙМАТОВА, Ш. Х. (2024). НАРУШЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЛЁССОВЫХ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ. *Строительство и образование*, (Спецвыпуск 1), 52-60.

28. ХАКИМОВ, Г. А. (2025). РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ УВЛАЖНЁННЫХ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЕБАНИЙ. *FARS International Journal of Education, Social Science & Humanities.*, 14(1), 109-118.

29. ХАКИМОВ, Г. А. (2025). ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЁССОВЫХ ОСНОВАНИЙ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ. *FARS International Journal of Education, Social Science & Humanities.*, 14(1), 119-129.

30. A.E.Berdimurodov, & A.A.Muminov. (2025). ADVANCED METHODS OF USING LOESS SOILS IN SEISMIC AREAS [Data set]. В *Latin American Journal of Education* (Т. 5, Выпуск 06, сс. 330-338). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17679588>

31. Хакимов, Г. А., Таджиходжаева, С. Р., Муминов, Ж. А., Кошкарбаева, Н. М., & Алламуродова, И. И. (2026). ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ И ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ. FARS International Journal of Education, Social Science & Humanities., 14(2), 12-27.

32. Хакимов, Г. А., Таджиходжаева, С. Р., Муминов, Ж. А., Кошкарбаева, Н. М., & Алламуродова, И. И. (2026). ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ИЗМЕНЕНИЕ СЕЙСМОПРОСАДОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛЁССОВЫХ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ. FARS International Journal of Education, Social Science & Humanities., 14(2), 1-11.