

## РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ УВЛАЖНЁННЫХ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЕБАНИЙ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18287626>

к.г.-м.н., доц. **Хакимов Г.А.**

(Ташкентский архитектурно-строительный университет)

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

### Аннотация

В данной научной статье приведены результаты экспериментальных исследований по изучению влияние интенсивности динамических колебаний на изменение деформации увлажнённого лёссового грунта. С увеличением интенсивности динамических колебаний прочностные характеристики увлажнённых лёссовых и других слабых связных грунтов уменьшаются, и это в основном происходит за счёт снижения связности, и это приводит к возрастанию деформации грунта. Как показали результаты экспериментальных исследований, что наиболее существенное влияние на разрушение структуры, снижение связности и увеличение деформации грунта играет частота колебаний. Также, анализы последствий многих разрушительных землетрясений показывает, что для увлажнённых лёссовых и других слабых связных грунтов наиболее опасны, с точки зрения нарушения динамической устойчивости, высокочастотные землетрясения.

### Ключевые слова

интенсивность, деформация, связность, частота, ускорение, сейсмическая просадка, динамическая воздействия, лёссовый грунт, плотность, прочностные характеристики.

**Введение.** Прочность и устойчивость увлажнённых связных, т.е. глинистых и лёссовых грунтов может в определённых сейсмических условиях снижаться, а сами грунты перейти в разжижённое состояние в условиях водонасыщения с последующим дополнительным уплотнением и сейсмической просадкой и это обстоятельство хорошо объясняется физической теорией сейсмического нарушения структуры увлажнённых связных грунтов. Нарушение прочности, устойчивости, структуры, т.е. образование деформации в лёссовых и других глинистых грунтах при динамическом на них воздействии является весьма сложным процессом,

протекающих в толще грунта, которые нельзя оценить по отдельным показателям. Значительную роль при этом играют внутренние факторы: состояние плотности-влажности грунта, наличие коллоидных минералов, гранулометрический состав, угол внутреннего трения, силы связности и др. С другой стороны, немаловажное значение в определённых условиях могут иметь также внешние факторы: величина внешней пригрузки, длительность, интенсивность и характер динамического воздействия. Среди этих факторов особенное значение придаётся интенсивности и характера (по частоты и амплитуды) динамического воздействия в степени деформируемости (уплотняемости) лёссовых грунтов [1-10].

УМЕНЬШЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ГРУНТОВ С ВОЗРАСТАНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, Т.Е. УСКОРЕНИЙ КОЛЕБАНИЙ БЕЗУСЛОВНО. ОДНАКО НЕОБХОДИМО ВЫДЕЛИТЬ НАИБОЛЕЕ СУЩЕСТВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ГРУНТОВ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЯ. КАК ПОКАЗЫВАЕТ ПРАКТИКА СТРОИТЕЛЬСТВА И АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ДЛЯ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫ (С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ) ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ [11-15].

В соответствии с поставленной задачей для изучения зависимости нарушение структуры и деформируемости увлажнённых лёссовых грунтов от характера динамических колебаний (по частоты и амплитуды) была выполнена серия опытов на образцах лёссовидного грунта.

**Материалы и методы.** Лабораторный эксперимент проведён на специально сконструированной для этой цели вибрационной установке. Виброустановка позволяет воспроизводить гармонические горизонтально-вынуждённые колебания при амплитуде от 0,1 до 6,0 мм и частоте 1-12 Гц. [3,5-7].

Колебания передаются с помощью кривошипно-шатунного механизма от электромотора постоянного тока. На виброплите жёстко крепятся компрессионные приборы с испытуемым образцом грунта, которому передаются заданные вибрационные воздействия. На поверхность испытуемого образца грунта можно придавать пригрузку от заданного вертикального давления в широких пределах.

Основные опыты проводились при частотах 2-12 Гц и амплитудах колебания 0,1-3,0 мм, при соответствующих ускорениях колебания от 800 мм/с<sup>2</sup>, что находится в пределах сейсмических ускорений колебания 7 баллов (по международной шкале MSK-64).

Исследовались лёссовые грунты ненарушенной структуры. Испытания на просадочность проводились по методу одной кривой по общепринятой методике вначале в статических условиях, затем в динамических. Либо испытывались параллельно два образца-близнеца в статических и динамических условиях.

Изменение режима вибрации в этих опытах достигалось за счет частоты колебания при постоянном значении амплитуды. Регистрируемым параметром в рассматриваемом случае явилась связность грунта до и после опыта.

Связность лёссовых грунтов, как один из определяющих факторов структурной прочности грунтов, определялась на описанной виброустановке методом шариковой пробы, разработанным Н.А.Цытовичем. Для этой целью проведены экспериментальные исследования с различными лёссовыми грунтами ненарушенной структуры по изучению факторов, оказывающих влияние на нарушение связности увлажнённых лёссов при колебании. Опыты проводились по следующей методике: из единого монолита отбирались два образца и после предварительного уплотнения при заданной нагрузке на одном из них определялось начальное значение сцепления; второй образец подвергался динамическому воздействию при сохранении прежней статической нагрузке и после прекращения сотрясения определялось новое значение связности. Все опыты проводились в трёхкратной повторности. Погружение шарика в грунт и его скорость при колебаниях показали об уменьшении величины связности (нарушение структуры, снижение прочности и уплотняемости) грунта в условиях опыта.

**Анализы и результаты.** Рассмотрим результатов опытов (табл.1). Так, при частоте  $f=2$  Гц первоначальная связность грунта  $C_w(H)=0.05$  МПа снизилась до  $C_w(K)=0.025$  МПа; при  $f=4$  Гц соответственно:  $C_w(H)=0.05$  МПа на  $C_w(K)=0.015$  МПа; при  $f=6$  Гц -  $C_w(H)=0.05$  МПа на  $C_w(K)=0.010$  МПа; при  $f=8$  Гц -  $C_w(H)=0.05$  МПа на  $C_w(K)=0.005$  МПа; при  $f=10$  Гц -  $C_w(H)=0.05$  МПа на  $C_w(K)=0.002$  МПа; при  $f=12$  Гц -  $C_w(H)=0.05$  МПа на  $C_w(K)=0.0005$  МПа (здесь,  $C_w(H)$ -связность грунта до вибрации,  $C_w(K)$ -связность грунта после вибрации).

Отмечено, что при частотах вибрации выше 12 Гц (высокочастотные землетрясения) величина связности водонасыщенного лёссового грунта уменьшается до нуля даже при 7-балльном землетрясении (по международной шкале MSK-64).

Автор также провёл опыты по выяснению роли частоты колебаний в изменении деформации лёссового грунта. На табл.2 показана зависимость деформации грунта от частоты колебания. Опыты были выполнены на четырёх разновидностях лёссовидного грунта при следующих параметрах: ускорение  $2000 \text{ мм/с}^2$ , пригрузке  $P=0,3 \text{ МПа}$ , амплитуде  $A=0,1-3 \text{ мм}$ , степени влажности  $S_r=0,8$ . Как следует из выполненных экспериментов деформируемость подверженного исследованию грунта зависит от частоты колебания. При повышении частоты динамического колебания от 2 до 12 Гц деформируемость увлажнённого лёссового грунта увеличивается до 2-3 раза. Отсюда следуют, что влияние динамического воздействия на деформируемость грунта оказывается более эффективным, если при всех прочих равных условиях это воздействие характеризуется большой частотой.

Приведенный пример достаточно отчетливо свидетельствует о нарушении структуры увлажнённого лёссового грунта при колебании и последующем его уплотнении, а также при этом, возможен переход в разжиженное состояние.

Как следует из выполненных экспериментов (табл.1,2) деформируемость подтверждённого исследованию грунта зависит от частоты колебания. Влияние динамического воздействия на деформируемость грунта оказывается более эффективным, если при всех прочих равных условиях это воздействие характеризуется большой частотой.

Изменение связности увлажнённого лёссового грунта при различных частотах динамического воздействия.

Таблица 1

| №  | Частота<br>вибрации $f$ , Гц | Связность до вибрации<br>$C_w(H)$ , МПа | Связность после вибрации<br>$C_w(K)$ , МПа |
|----|------------------------------|---|--|
| 1  | 2                            | 3                                       | 4  |
| 1. | 2                            | 0,05                                    | 0,025                                      |
| 2. | 4                            | 0,05                                    | 0,015                                      |
| 3. | 6                            | 0,05                                    | 0,010                                      |
| 4. | 8                            | 0,05                                    | 0,005                                      |
| 5. | 10                           | 0,05                                    | 0,002                                      |
| 6. | 12                           | 0,05                                    | 0,0005                                     |

Изменение величины деформации увлажнённого лёссового грунта при различных частотах динамического воздействия.

Таблица 2

| №  | Название грунта | Плотность сухого грунта, в кг/см <sup>3</sup> | Деформация грунта, в мм/м, при частотах |    |    |    |    |    |
|----|-----------------|---|---|----|----|----|----|----|
|    |                 |   | 2                                       | 4  | 6  | 8  | 10 | 12 |
| 1. | Супесь          | 1,45  | 21                                      | 34 | 45 | 52 | 55 | 57 |
| 2. | Супесь          | 1,46  | 20                                      | 32 | 42 | 50 | 52 | 54 |
| 3. | Суглинок        | 1,52  | 18                                      | 26 | 32 | 35 | 37 | 38 |
| 4. | Супесь          | 1,58  | 9                                       | 16 | 21 | 24 | 26 | 28 |

На рис.1 показаны зависимости деформации лёссовых грунтов при различных ускорениях и частотах колебаний. Графики зависимости величины деформации лёссовых грунтов со ступенчато нарастающей частотой вибрации (при одинаковых ускорениях) приведены на рис.2.

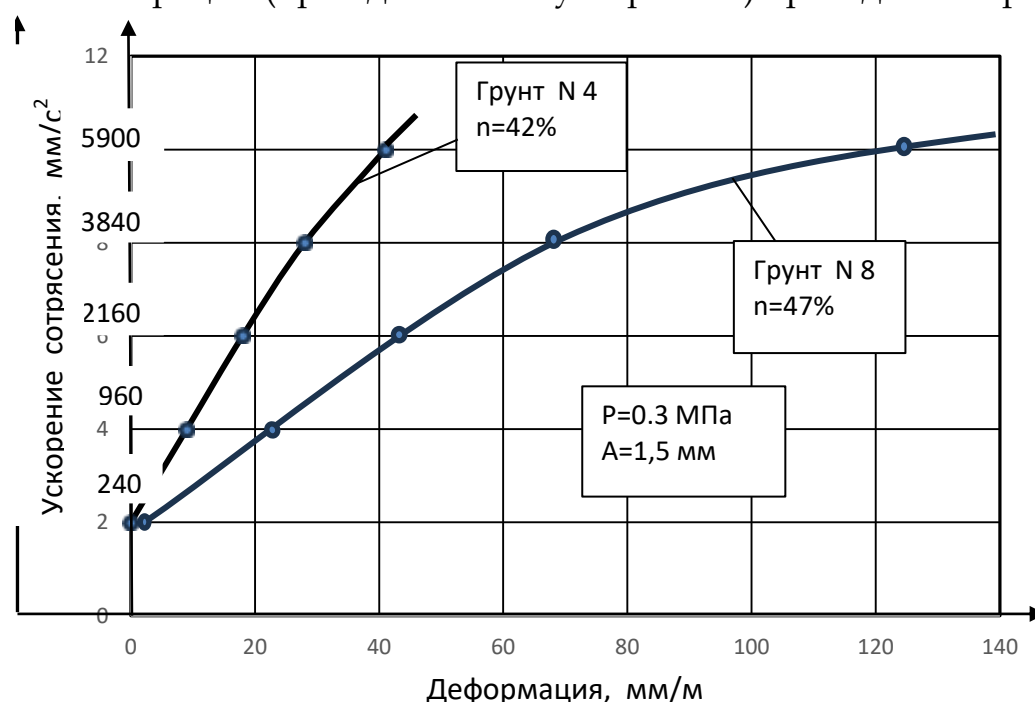


Рис.1 Деформация лёссовых грунтов при различных ускорениях и частотах колебаний

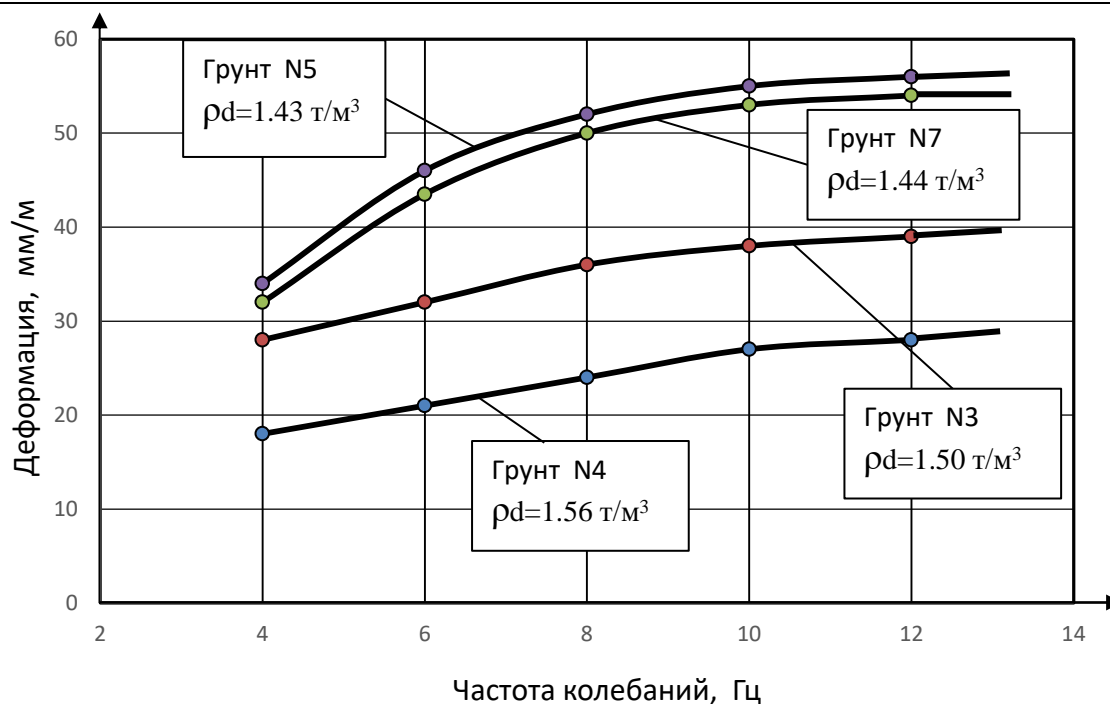


Рис.2 Зависимость величины деформации лёссовых грунтов от частоты колебаний при одинаковых ускорениях

УМЕНЬШЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ГРУНТОВ С ВОЗРАСТАНИЕМ УСКОРЕНИЙ БЕЗУСЛОВНО. КАК ПОКАЗАЛИ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГИХ СПЕЦИАЛИСТОВ, А ТАКЖЕ НАШИ, УВЕЛИЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ СРАВНИТЕЛЬНО МАЛО ВЛИЯЕТ НА РАЗВИТИЕ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГРУНТА. ОДНАКО НЕОБХОДИМО ВЫДЕЛИТЬ НАИБОЛЕЕ СУЩЕСТВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ГРУНТОВ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЯ. КАК ПОКАЗЫВАЕТ ПРАКТИКА СТРОИТЕЛЬСТВА И АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ДЛЯ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫ (С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ) ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ [16-24].

**Закключение и рекомендации.** Результаты проведённых экспериментальных исследований по изучению влияние интенсивности динамического (сейсмического) воздействия на развитие дополнительной деформации (сейсмической просадки) лёссовых грунтов показали:

1. Как известно, что уменьшение сейсмостойкости не только глинистых и лёссовых, но и других грунтов с возрастанием интенсивности сотрясений безусловно.

2. С увеличением интенсивности внешних колебаний, прочностные характеристики глинистых и лёссовых грунтов резко уменьшаются, что приводит к возрастанию деформации.



3. Для нарушения структуры связных грунтов с другими факторами необходимо достаточная интенсивность сотрясения, выражающаяся в виде ускорения и это ускорения должна быть способной нарушить силы связности между его частицами.

4. ОПЫТЫ ПОКАЗАЛИ РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИИ УВЛАЖНЁННЫХ ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЕБАНИЯ. ПРИЧЁМ СУЩЕСТВЕННУЮ РОЛЬ НА ПРОЦЕСС ОКАЗЫВАЮТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УВЕЛИЧИВАЮТ СПОСОБНОСТЬ ГРУНТА ПЕРЕХОДИТЬ В ДИНАМИЧЕСКИ НАРУШЕННОЕ СОСТОЯНИЕ. ОТСЮДА СЛЕДУЕТ, И КАК ПОКАЗЫВАЕТ ПРАКТИКА СТРОИТЕЛЬСТВА, А ТАКЖЕ АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ МНОГИХ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ЧТО ДЛЯ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫ (С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ) ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ.

5. Динамическая устойчивость увлажнённых лёссовых грунтов снижается с воздействием на них высокочастотных землетрясений, с достаточной длительности.

6. Как показали результаты наших экспериментальных исследований при одинаковых ускорениях динамических колебаний, разрушение структуры и разжижение увлажнённого лёссового грунта происходит в основном за счёт увеличения частоты колебаний. С увеличением частоты динамических колебаний пропорционально уменьшается прочностные характеристики (в основном за счёт связности) увлажнённого лёссового грунта. Также с увеличением частоты динамических колебаний увеличивается деформация (уплотняемости) лёссового грунта.

7. ИЗ ВЫШЕИЗЛОЖЕННЫХ МОЖНО ОТМЕТИТЬ, ЧТО ВЫСОКОСЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ВИБРОМАШИНЫ НАДО УДИЛЯТЬ ОСОБОЕ ВНИМАНИЕ НА ЧАСТОТУ ВИБРАЦИИ. КАК ПОКАЗАЛИ НАШИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВИБРАЦИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ВЛИЯЕТ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ, А ТАКЖЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ.

8. Полученные результаты по изучению влияние интенсивности динамического воздействия и его параметров (по частоты и амплитуды) на развитие деформации грунтов могут учитываться при рекомендации по виброуплотнению грунтов, а также при проектировании и строительстве зданий и сооружений на увлажнённых лёссовых грунтах в сейсмических районах.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. 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.
2. 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.
3. Расулов Х.З. Сейсмостойкость и сейсмопросадка лёссовых грунтов. Монография. Ташкент: Фан. 2020. – 336 с.
4. Расулов Х.З., Сайфиддинов С., Частоедов Ю.Н., Хакимов Г.А., Бадалов Д.С. Сейсмопросадка лёссовых грунтов. Седьмая Всесоюзная конференция по динамике оснований, фундаментов и подземных сооружений (Днепропетровск, 25-27 сентября 1989г.). Тезисы докладов, - Москва, 1989, с.179-180.
5. Khakimov, G. A. CHANGES IN PLASTIC ZONES IN LESS BASES UNDER SEISMIC VIBRATIONS. *Journal of New Zealand*, 742-747.
6. 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.
7. GMFN, D., Kh, S. S., & Muminov, M. M. (2022). DEFORMATION OF MOISTENED LOESS FOUNDATIONS OF BUILDINGS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS.
8. 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..
9. 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.
1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Akramovich, K. G., Rakhmonkulovna, A. K., Rustamovna, T. S., & Abduxalilovich, M. J. THE EVENT PROVIDES SEISMIC RESISTANCE OF BUILDINGS AND STRUCTURES BUILT ON MOIST LOESS SOILS.

15. 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.