

**А.Д. Деменев, В.Т. Хмурчик, Н.Г. Максимович,
Е.П. Катаева, А.М. Сединин**
ПГНИУ, demenevartem@gmail.com

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ И РАСТВОРА ХЛОРИДА ЖЕЛЕЗА (III)

Метаногенез в грунтовых массивах является одним из наиболее нежелательных микробиологических процессов, т.к. может негативно воздействовать на напряженное состояние грунтов, а также на их физико-механические свойства. Предложен биотехнологический метод подавления повышенной газогенерации за счет добавления раствора хлорида трехвалентного железа (FeCl_3) в грунтовый массив. Проведено углубленное изучение влияния этого раствора на песчаные грунты. В статье приводятся основные результаты экспериментальных работ и физико-механических испытаний грунтов при их обработке веществом-ингибитором.

Ключевые слова: свойства грунтов, метаногенез, биотехнология, обработка грунтов, безопасная эксплуатация сооружений.

A.D. Demenev, V.T. Khmurchik, N.G. Maksimovich, E.P. Kataeva, A.M. Sedinin
Perm State University, demenevartem@gmail.com

THE GEOTECHNICAL PARAMETERS OF SANDY SOILS UNDER THE TREATMENT WITH FeCl_3 SOLUTIONS

Methanogenesis in the soils is one of the most undesirable microbiological processes because it can negatively affect the stress state of the soils and to geotechnical properties. A biotechnological method for suppressing increased gas generation by using a solution of FeCl_3 is suggested. The detailed study of the effect of this solution to sandy soils was conducted. The

article presents the main results of experimental research and geotechnical testing of soils when they are treated with an inhibitor substance.

Key words: Soil properties, methanogenesis, biotechnologies, treatment of soil, safety operation of construction.

Основными элементами грунтов являются твердые минеральные частицы, вода и газ. Свойства грунтов зависят от состава всех его компонентов их соотношения и взаимодействия. Также в грунтах разного генезиса широко распространены микроорганизмы, их численность в среднем в пересчете на 1 г субстрата находится в пределах 10^5 - 10^7 . Активность микробиоты может привести к преобразованию твердой, жидкой и газовой составляющей вещества, а также к ряду негативных явлений и трудно прогнозируемым последствиям (Дашко, 2014; Maksimovich, 2019; Demenev, 2019).

Комплекс натурных наблюдений на территории грунтового массива (грунтовой плотины), расположенного на территории г. Перми в зоне активной техногенной нагрузки, показал развитие ряда микробиологических процессов: аэробного и анаэробного метаболизма (нитрификация, железоредукция, сульфатредукции, метаногенез. Активное протекание микробиологических процессов может воздействовать на напряженное состояние грунтов, а также на их физико-механические свойства (Кузнецов, 1965; Максимович, 2013, 2014, 2015; Радина, 1973; Болотина, 1987; Дашко, 2014). С точки зрения безопасной эксплуатации инженерных сооружений микробиологический процесс метаногенеза в грунтовых массивах является одним из наиболее нежелательных. Метан мало растворим в воде и в анаэробных условиях может накапливаться в газовой фазе, изменяя при этом напряженное состояние грунта, ведущее к его постепенному разуплотнению (Радина, 1973).

При проведении газогеохимических исследований в районе грунтового массива были отмечены высокие концентрации метана (среднее значение – 721 ppm, с очагами до 12000 ppm) и диоксида углерода (среднее значение – около 9700 ppm, с очагами до 52000 ppm). В качестве наиболее вероятных источников данных компонентов являются процессы биохимического преобразования рассеянного органического вещества. При этом не исключается поступление этих компонентов из нижележащих отложений. Одним из факторов, влияющих на повышенные концентрации газов в грунтовом массиве, может быть наличие торфа, так в пробуренных скважинах было отмечено присутствие торфа и заторфованных грунтов различной мощностью до 2 м.

В микробиологических исследованиях для подавления нежелательной активности микроорганизмов принято использовать специальные вещества-ингибиторы бактериальных процессов. Подавление микробиологического процесса метаногенеза – технически сложный и экономически затратный процесс, предполагающий использование таких веществ, как 2-бромэтансульфоновая кислота, либо токсичные для окружающей среды хлорзамещенные аналоги метана – хлороформ, четыреххлористый углерод, хлористый метилен (Максимович, 2019). При этом полного ингибирования процесса удается достичь не всегда (Oremland, 1988).

По ряду причин было принято решение (Максимович, 2019) использовать безопасный для окружающей среды биотехнологический подход подавления метаногенеза. В настоящее время применение биотехнологических методов для решения прикладных проблем в области инженерной геологии и геотехнике набирает все большую значимость, в частности, для улучшения механических свойств грунтов (Almajed, 2019).

Такой подход обладает рядом преимуществ и заключается в активизации той части микробного сообщества грунтового массива, которое будет осуществлять процесс, конкурирующий с метаногенезом (Заварзин, 2001; Lovley, 1987; Максимович, 2019). Для этого необходимо создать благоприятные условия для развития соответствующего микробного сообщества с помощью внесения соединений, которые будут играть роль акцепторов электронов при анаэробном разложении органического вещества (Achnich, 1995; Chidthaisong, 2000; Klüber, 1998; Lovley, 1986; Roden, 2003).

Добавление соединений железа считается подходящей стратегией для снижения эмиссии метана (Jäckel, 2005; Vodegom, 2004). Восстановление соединений трехвалентного железа, железоредукция, также является более термодинамически выгодным для микробного сообщества процессом, чем метаногенез. В ходе процесса не образуются как токсичные, так и газообразные продукты. Процесс восстановления железа способен полностью подавить метаногенез и обнаруживается во многих природных средах, то есть естественен для окружающей среды. Для протекания данного процесса необходимо наличие в среде ионов трехвалентного железа, которые можно внести в виде водорастворимых солей. Поскольку для железа также существуют нормативы по его содержанию в воде, то необходимо использовать минимально возможные концентрации, которые были бы достаточны для подавления метаногенеза (Максимович, 2019).

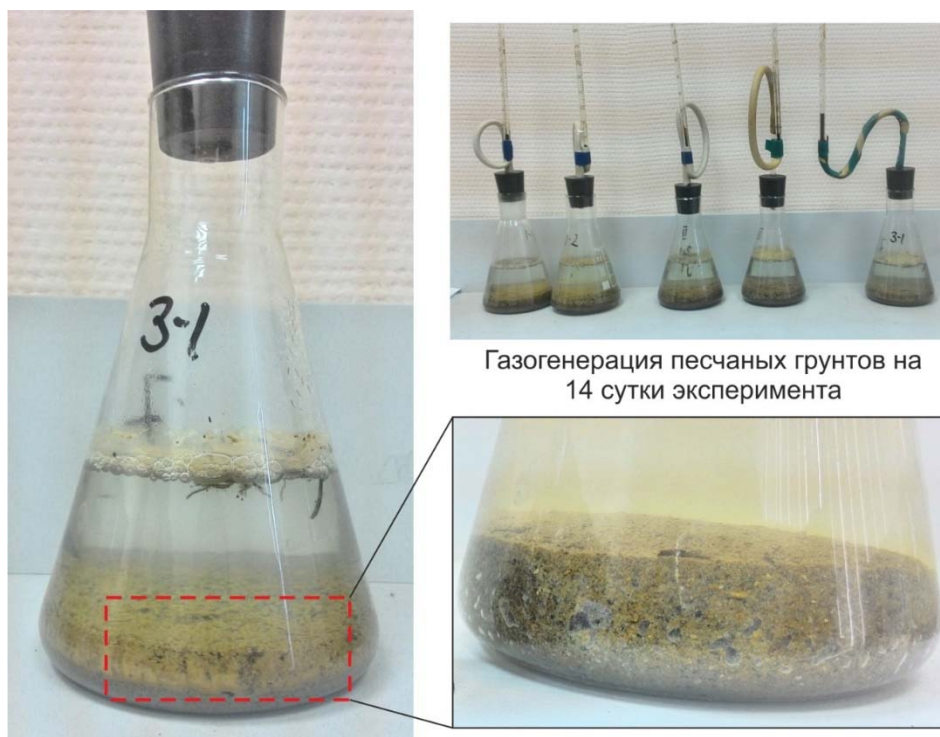


Рис.1. Биогенное образование метана в песчаных грунтах без внесения раствора FeCl_3

Наиболее оптимальным реагентом для замещения бактериального процесса метаногенеза, на наш взгляд, является хлорид трехвалентного железа (FeCl_3). Проведенные экспериментальные исследования показали высокую эффективность его использования для подавления процессов метаногенеза в песчаных грунтах (Максимович, 2019).

В связи с этим потребовалось углубленное изучение влияния раствора хлорида железа (III) на прочностные характеристики песков.

Изменение микроструктуры высокодисперсных грунтов от состава обменных катионов связано с возникновением и распадом микроагрегатов. Это может сказаться при искусственном насыщении грунта, каким либо одним катионом, в растворах с крайне высокой его концентрацией. Одновалентные ионы (особенно имеющие малый ионный радиус и большие гидратные оболочки – Li^+ , Na^+) резко увеличивают дисперсность грунта, а двух- и трехвалентные катионы снижают её (Ca^{2+} , Fe^{3+}) (Сергеев, 1971).

Влияние обменных катионов на содержание в грунтах связанной воды, характер микроструктуры и микротекстуры и свойства грунтов значительно больше в том случае, когда в глинистой фракции содержатся минералы с раздвижными кристаллическими решетками, имеющие большую емкость катионного обмена (монтмориллонит); при содержании в глинистой фракции минералов с жесткими межпакетными связями, имеющие малую емкость катионного обмена (каолинит, гидрослюда) роль обменных катионов в указанном отношении становится второстепенной. Катионы Fe^{3+} имеют наибольшую способность к замещению других ионов, в связи с достаточно большим ионным радиусом. Однако ион, который по своему размеру лучше подходит к кристаллической решетке минерала, легче замещает ионы с менее подходящими размерами (Трофимов, 2005).

Объектом обработки веществом-ингибитором микробиологических процессов являются грунты изучаемого массива – пески средние и мелкозернистые, т.е. грунты с относительно низким содержанием глинистой фракции. В связи с тем, что наибольшая интенсивность процессов ионного обмена характерна для высокодисперсных грунтов с раздвижными кристаллическими решетками, значительного воздействия при внесении вещества-ингибитора в песчаные грунты не прогнозируется. Также стоит учесть, факт того, что рекомендуемое количество вещества-ингибитора в вносимом растворе имеет относительно невысокие расчетные концентрации при сравнении с фоновыми показателями.

Для определения потенциального воздействия вещества-ингибитора (FeCl_3) микробиологических процессов на песчаные грунты были проведены экспериментальные исследования, имитирующие обработку грунтового массива. Концентрация FeCl_3 в вносимом растворе была увеличена в 2 раза по сравнению с расчетным количеством (с 5 мг/дм^3 до 10 мг/дм^3) для более показательной оценки возможного воздействия хлористого железа на геотехнические параметры песков.

В настоящем эксперименте в первую очередь представляет интерес потенциальное изменение сцепления и угла внутреннего трения песчаных грунтов, т.к. эти показатели напрямую влияют на устойчивость откосов и, следовательно, безопасную эксплуатацию инженерных сооружений и массивов. Песчаные грунты доводились до полного водонасыщения тремя различными растворами:

- речной водой с концентрацией FeCl_3 – 0 мг/дм³ (контроль – образцы 1,2);
- речной водой с концентрацией FeCl_3 – 10 мг/дм³ (образцы 3,4);
- дистиллированной водой с концентрацией FeCl_3 – 10 мг/дм³ (образцы 5,6).

Обработка грунтов (рис. 1) проводилась в течение 7 суток, после чего образцы передавались в грунтовую для последующих физико-механических испытаний, результаты экспериментальных исследований представлены в Таблице.



Рисунок 2 – Обработка грунтов веществом-ингибитором (FeCl_3)

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что внесение увеличенной в 2 раза концентрации (с 5 мг/дм³ до 10 мг/дм³) вещества-ингибитора в песчаные грунты не оказывает существенного негативного влияния на прочностные свойства грунтов. Наиболее приближенными к естественным условиям являются эксперименты с образцами 3 и 4, т.к. в основе раствора используется вода, отобранная из р. Кама в районе г. Перми. Сцепление грунтов образцов 1 и 2 увеличилось с 0,001-0,004 МПа до 0,003-0,007 МПа у образцов 3 и 4, угол внутреннего трения увеличился с 40-41 град. до 46-57 град. соответственно. Стоит отметить, что в естественных условиях при внесении в грунтовый массив веществ-ингибиторов ожидается еще меньшее воздействие, т.к. рекомендуемые концентрации внесения FeCl_3 составляют половину от лабораторного эксперимента, а также внесенное вещество будет подвергаться более интенсивному разбавлению. Также в случае обработки грунтового массива рекомендуется провести дополнительные физико-механические испытания грунтов до и после обработки веществом ингибитором, а также оценить изменение фильтрационных характеристик.

Таблица. Прочностные и физические свойства песка средней крупности после обработки

№ Образца	Влажность, д.е. естествен- ная	Коэффи- циент водона- сыщен- ия, д.е.	Плотность, г/см ³			Коэф- фици- ент по- ристо- сти	Сцеп- ление, МПа	Угол внутрен- него тре- ния, град.
			частиц грунта	грунта при- родная	сух. грунта			
		S _r	ρ _s	ρ	ρ _d	e	C	φ
1	0,197	1,020	2,64	2,09	1,75	0,509	0,002	40
2	0,225	0,970	2,64	2,01	1,64	0,610		41
3	0,243	0,970	2,64	1,98	1,59	0,660	0,005	46
4	0,249	1,060	2,64	2,04	1,63	0,620		57
5	0,247	1,050	2,64	2,03	1,63	0,620	0,004	59
6	0,253	1,060	2,64	2,03	1,62	0,630		60

Таким образом, биотехнологический метод подавления биогенного метанообразования в песчаных грунтах обладает рядом преимуществ, безопасен для окружающей среды и не ведет к значительным изменениям свойств песчаных грунтов. Предлагаемый подход может быть использован в зонах активного техногенного воздействия на грунтовые массивы, где наблюдаются интенсивные процессы биогенной газогенерации. Однако для каждого конкретного объекта рекомендуется проводить аналогичные детальные исследования по изучению воздействия вносимых растворов на геотехнические параметры грунтовых массивов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00042.

Библиографический список:

1. Болотина И.Н., Сергеев Е.М. Микробиологические исследования в инженерной геологии // Инженерная геология, № 5, 1987. С. 3–17.
2. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота // СПб.: типография «МСТ», 2014. 280 с.
3. Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию. М., Книжный дом «Университет», 2001. 256 с.
4. Кузнецов, А.М. О газовых явлениях в основании бетонных плотин // Гидротехническое строительство, № 10, 1965. С. 33-37.
5. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Микробиологические процессы в грунтовых плотинах // Инженерные изыскания, № 9, 2013. С. 46–51.
6. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Лаздовская М.А., Деменев А.Д. Комплекс методов исследования микробиологической активности в грунтовых плотинах // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология, география, № 4, 2014. С. 88-100.
7. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Деменев А.Д. Роль микроорганизмов в повышении мутности дренажных вод плотины // Гидротехническое строительство, № 11, 2015. С. 84–86.
8. Радина В.В. Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния // Гидротехническое строительство, № 9, 1973. С. 22–24.
9. Грунтоведение. Изд-е 3-е // под ред. Е. М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1971. 295 с.

10. Грунтоведение. Изд-е 2-е, переработанное и дополненное // под общ. ред. В.Т.Трофимова. М.: Наука, 2005. 1024 с.
11. *Almajed A., Khodadadi Tirkolaei H., Kavazanjian E., Hamdan N.* Enzyme Induced Biocemented Sand with High Strength at Low Carbonate Content // *Nature*, vol 9, 2019.
12. *Achtnich C., Bak F., Conrad R.* Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil // *Biol Fert Soils*, 19, 1995. P. 65–72.
13. *Chidthaisong A., Conrad, R.* Turnover of glucose and acetate coupled to reduction of nitrate, ferric iron, and to methanogenesis in anoxic field soil // *FEMS Microbial Ecol*, vol. 31, 2000. P. 73–86.
14. *Demenev A.D, Maksimovich N.G, Khmurchik V.T, Sedinin A.M.* Microbial Changes of the Earth Dam Mechanical Properties and the Improvement of Them // *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings San Francisco, California*, vol 4, 2019. P. 41–45.
15. *Jäckel U., Russo S, Schnell S.* Enhanced iron reduction by iron supplement: A strategy to reduce methane emission from paddies // *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 37, 2005. P. 2150–2154.
16. *Klüber H.D., Conrad R.* Effects of nitrate, nitrite, NO and N₂O on methanogenesis and other redox processes in anoxic rice field soil. *FEMS Microbiol Ecol*, vol. 25, 1998. P. 301-318.
17. *Lovley D.R., Phillips E.J.P.* Organic Matter Mineralization with Reduction of Ferric Iron in Anaerobic Sediments // *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 51, no. 4, 1986. P. 683–689.
18. *Lovley D.R., Phillips E.J.P.* Competitive Mechanisms for Inhibition of Sulfate Reduction and Methane Production in the Zone of Ferric Iron Reduction in Sediments // *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 53, no. 11, 1987. P. 2636–2641.
19. *Maksimovich N.G, Khmurchik V.T, Demenev A.D, Sedinin A.M.* Microbial Activity Within the Earth Dam: Consequences and the Suppression Strategy // *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California*, vol 4, 2019 . P. 3–7.
20. *Oremland R.S., Capone D.G.* Use of “specific” inhibitors in biogeochemistry and microbial ecology // *Advances in Microbial Ecology*, vol. 10, 1988. P. 285–383.
21. *Roden E.E., Wetzel R.G.* Competition between Fe (III)-Reducing and Methanogenic Bacteria for Acetate in Iron-Rich Freshwater Sediments. *Microb Ecol*, vol. 45, 2003. P. 252-258.
22. *Van Bodegom Peter M., Scholten Johannes C.M., Stams Alfons J.M.* Direct inhibition of methanogenesis by ferric iron // *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 49, 2004. P. 261–268.