

ПРОГНОЗ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СЦЕПЛЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

¹Мелкишев О.А., ¹Мерсон М.Э., ²Зарембо И.И., ³Алванян А.К.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, e-mail: nedra@nedra.perm.ru;

²ООО «Научно-исследовательское проектное, производственное предприятие
по природоохранной деятельности «Недра», Пермь, e-mail: nedra@nedra.perm.ru;

³Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, e-mail: kafedra.ingeo@gmail.com

Исследование грунтового массива необходимо для обоснованного принятия проектных решений для строительства и развития инфраструктуры сооружений промышленного и гражданского назначения. Особенно важным это становится при строительстве в сложных инженерно-экологических и инженерно-геологических условиях, в том числе в условиях многолетнемерзлых грунтов. При этом практика инженерно-геологических изысканий показывает, что лабораторному исследованию физических свойств грунтов отводится значительно большая роль, чем механическим испытаниям, что связано с более высокой стоимостью и длительностью испытаний. Поэтому важной является проблема прогноза эквивалентного сцепления многолетнемерзлых грунтов по данным их физических свойств. В работе исследованы взаимосвязи между физическими и механическими свойствами многолетнемерзлых грунтов. Составлены математические модели, позволяющие прогнозировать эквивалентное сцепление по данным физических свойств грунтов. Для анализа факторов, оказывающих наибольшее влияние на прочностные характеристики грунтов и прогноза эквивалентного сцепления ММГ, использовался аппарат пошаговой множественной регрессии, который ставит своей целью отбор наиболее значимых признаков, влияющих на прогнозируемую величину.

Ключевые слова: физические свойства, влажность, льдистость, удельная поверхность, диаметр частиц грунта, эквивалентное сцепление

FORECAST OF THE PERMAFROST SOILS EQUIVALENT COUPLING

¹Melkishev O.A., ¹Merson M.E., ²Zarembo I.I., ³Alvanyan A.K.

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: pushkareva@nedra.perm.ru;

²Scientific, Research, Design and Production Enterprise for Nature Protection Activity, Ltd, «Nedra»,
Perm, e-mail: nedra@nedra.perm.ru;

³Perm State National Research University, Perm, e-mail: kafedra.ingeo@gmail.com

The study of the soil mass is necessary for informed decision-making project for the construction and development of infrastructure facilities for industrial and civil use. It becomes particularly important in the construction of a complex engineering and environmental and geotechnical conditions, including the conditions of permafrost. At the same time the practice of engineering geological survey shows that the laboratory study of physical properties of soils is given a much greater role than mechanical tests that are associated with higher cost and duration of tests. So important is the problem of forecasting equivalent clutch permafrost according to their physical properties. We studied the relationship between the physical and mechanical properties of permafrost. The mathematical model used to predict equivalent clutch according to the physical properties of soils. To analyze the factors that have the greatest influence on the strength characteristics of soils and prognosis equivalent clutch MMG apparatus was used stepwise multiple regression, which aims to select the most significant features affecting the predicted value.

Keywords: physical properties, wetness, ice content, specific surface area, diameter of soils particles, equivalent coupling

Исследование грунтового массива необходимо для обоснованного принятия проектных решений для строительства и развития инфраструктуры сооружений промышленного и гражданского назначения [1, 9]. Особенно важным это становится при строительстве в сложных инженерно-экологических [2–7] и инженерно-геологических [8] условиях, в том числе в условиях многолетнемерзлых грунтов. При этом практика инженерно-геологических изысканий показывает, что лабораторному исследованию физических свойств грунтов отводится значительно большая роль, чем механическим испытаниям, что связано

с более высокой стоимостью и длительностью испытаний.

Поэтому важной является проблема прогноза эквивалентного сцепления многолетнемерзлых грунтов по данным их физических свойств.

Материалы и методы исследований

Определение прочностных и деформационных характеристик многолетнемерзлых грунтов производилось по ГОСТ 12248-2011, физических – по ГОСТ 5180-84, ГОСТ 30416-2012.

Общий объем выборки физических свойств составил 148 определений, включающих: 91 – суглинок, 38 – песков, 13 – супесей, 6 – глин. Исследования проводились в грунтовой лаборатории ООО НИПППД «Недра».

Прочностные и деформационные характеристики ММГ получены по результатам лабораторных исследований 23 монолитов ненарушенного строения, включающих 10 – песков и 13 – суглинков. Испытания проводились при температуре – 1°С на базе лаборатории геокриологических исследований ПНИПУ.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты определения физико-механических свойств грунтов представлены в таблице.

Выполненный анализ результатов определений физических свойств, приведенных в таблице, показывает закономерные изменения средних значений в ряду глина – песок по основным показателям физических и прочностных свойств ММГ, что требует детального рассмотрения факторов, оказывающих влияние на прочность и механизмы ее формирования.

Механизм формирования прочности

Существует ряд гипотез, объясняющих механизм разрушения материалов [10], которые можно объединить в три группы. В первую группу входят гипотезы, основанные на трещинообразовании материалов. Они основаны на теории Гриффитса. Во вторую группу входят гипотезы, объясняющие разрушение материалов с позиций максимальных касательных напряжений, возникающих в материале при его нагружении. К основополагающим гипотезам этой группы можно отнести теории Кулона – Мора. В третью группу входят гипотезы, объясняющие разрушение материалов с позиций трещинообразования и максимальных касательных напряжений. Это гипотезы Н.Н. Давиденкова, Я.Б. Фридмана, А.Н. Ставрогина, Б.Г. Тарасова и многих других исследователей.

Физико-механические свойства грунтов

сред.арифм. ± сред. квадр. откл. кол-во определений		Глины	Суглинки	Супеси	Пески
Суммарная влажность МГ W_{tot} , д.е.		$0,315 \pm 0,1275$ 6	$0,232 \pm 0,0741$ 91	$0,194 \pm 0,0322$ 13	$0,219 \pm 0,0355$ 38
Плотность грунта *, г/см ³		$1,78 \pm 0,176$ 2	$1,94 \pm 0,138$ 34	$1,92 \pm 0,092$ 4	$1,96 \pm 0,134$ 20
Плотность частиц грунта, г/см ³		$2,72 \pm 0,048$ 6	$2,69 \pm 0,014$ 90	$2,67 \pm 0,009$ 5	$2,66 \pm 0,015$ 36
Пористость *, %		$55,17 \pm 5,296$ 2	$44,42 \pm 6,694$ 34	$41,79 \pm 2,553$ 4	$39,98 \pm 5,290$ 20
Коэффициент пористости *		$1,246 \pm 0,2652$ 2	$0,825 \pm 0,2229$ 34	$0,720 \pm 0,0742$ 4	$0,679 \pm 0,1532$ 20
Суммарная льдистость мерзлого грунта, I_{tot} *, д.е.		$0,355 \pm 0,0172$ 2	$0,348 \pm 0,1083$ 34	$0,294 \pm 0,0397$ 4	$0,236 \pm 0,1438$ 20
Степень заполнения объема пор МГ льдом и незамерзшей водой, S_r *, д.е.		$1,057 \pm 0,1058$ 2	$0,702 \pm 0,2631$ 34	$0,883 \pm 0,1479$ 4	$0,953 \pm 0,1554$ 20
Число пластичности, д.е.		$0,204 \pm 0,0277$ 6	$0,125 \pm 0,0288$ 91	$0,048 \pm 0,0148$ 13	-
Md, мм		$0,045 \pm 0,0253$ 6	$0,084 \pm 0,0311$ 91	$0,152 \pm 0,0322$ 13	$0,228 \pm 0,0554$ 38
S _{уд} , см ² /см ³		$945,66 \pm 451,649$ 6	$429,93 \pm 92,733$ 90	$297,96 \pm 63,742$ 5	$167,57 \pm 44,311$ 36
Характеристики неоднородности гранулометрического состава	σ, д.ед,	$0,067 \pm 0,0432$ 6	$0,114 \pm 0,0482$ 91	$0,175 \pm 0,0637$ 13	$0,144 \pm 0,0635$ 38
	A, д.ед,	$4,211 \pm 1,6763$ 6	$3,151 \pm 2,0507$ 91	$1,417 \pm 0,7205$ 13	$1,486 \pm 0,4955$ 38
	E, д.ед,	$35,892 \pm 30,1688$ 6	$21,128 \pm 48,2865$ 91	$2,453 \pm 3,4155$ 13	$5,165 \pm 6,435$ 38
	Квар, д.ед,	$1,482 \pm 0,355$ 6	$1,342 \pm 0,2515$ 91	$1,132 \pm 0,2908$ 13	$0,6 \pm 0,154$ 38
Степень засоленности грунта*, %		$0,044 \pm 0,0019$ 2	$0,065 \pm 0,0792$ 10	$0,067 \pm 0,0000$ 1	$0,022 \pm 0,013$ 10
Эквивалентное сцепление * Seq, МПа		-	$0,003 \pm 0,0026$ 13	-	$0,005 \pm 0,0020$ 10
Условно-мгновенное сопротивление срезу ММГ по поверхности смерзания со стальной плашкой * Rafo, МПа		-	$0,142 \pm 0,0071$ 7	-	$0,165 \pm 0,105$ 3

Примечание. * – характеристики только для монолитов ММГ ненарушенного строения.

Анализ влияния геологических факторов на прочность показывает, что к основным признакам, определяющим эквивалентное сцепление грунтов, можно отнести размерность структурных элементов (гранулометрический состав), прочность структурных связей и пористость. Остальные показатели (плотность, влажность (льдистость) и др.) имеют подчиненное значение.

С учетом дополнительных характеристик наибольшее различие между типами грунтов установлено по параметрам удельной поверхности $S_{уд}$ и математическому ожиданию диаметра частиц грунта Md (таблица), которые связаны между собой обратной зависимостью (рис. 1).

Выполнение сопоставления $S_{уд}$ и Md показало, что в пределах общей обратной нелинейной закономерности песчаные грунты характеризуются наибольшими значениями Md и малыми значениями $S_{уд}$. Кроме того, они характеризуются очень тесной, практически линейной, обратной зависимостью удельной поверхности от диаметра частиц. Глины, напротив, обладают максимальной величиной $S_{уд}$ и минимальным значением Md . Суглинки занимают промежуточное положение между песками и глинами и характеризуются обратной нелинейной зависимостью между Md и $S_{уд}$ с большим разбросом значений по сравнению с песками.

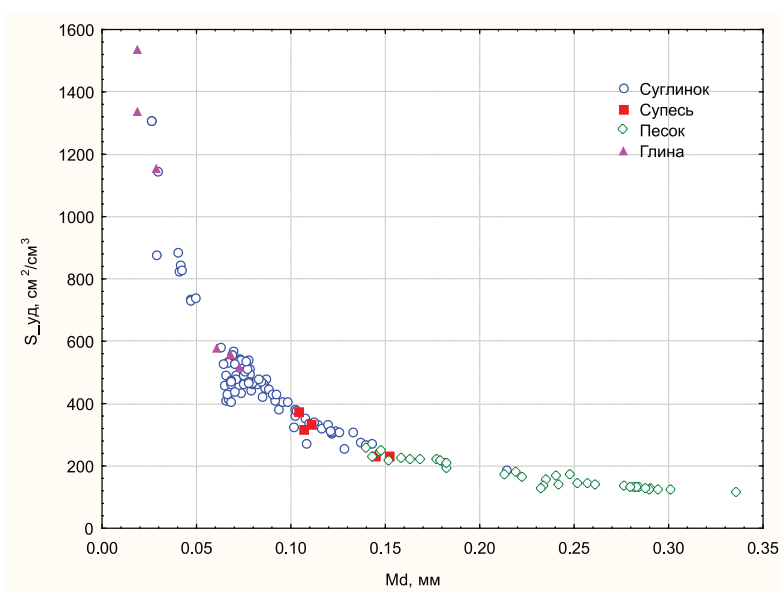


Рис. 1. Корреляционное поле между Md и $S_{уд}$

Подтверждением наличия зависимости содержания рыхлосвязанной воды от $S_{уд}$ служат корреляционные зависимости между $S_{уд}$ и влажностью на границе раскатывания (рис. 2), поэтому учет дополнительных характеристик (Md и $S_{уд}$) является оправданным при построении моделей прогноза упругих и прочностных характеристик ММГ.

На полях корреляции прослеживается общая тенденция к увеличению влажности на границе текучести с ростом удельной поверхности для глинистых грунтов, однако при $S_{уд} > 400 \text{ см}^2/\text{см}^3$ влажность на границе раскатывания практически не зависит от удельной поверхности.

$$Seq = -0,017383 + 0,208845 \cdot Md + 0,000023 \cdot S_{уд} - 0,007229 \cdot Sr, \text{ при } r = 0,72.$$

С увеличением математического ожидания диаметра частиц грунта (Md) и удельной

Создание моделей прогноза

Для анализа факторов, оказывающих наибольшее влияние на прочностные характеристики грунтов и прогноза эквивалентного сцепления ММГ, использовался аппарат пошаговой множественной регрессии, который ставит своей целью отбор наиболее значимых признаков влияющих на прогнозируемую величину.

Так, для нахождения значения эквивалентного сцепления Seq , МПа по ускоренному методу (за 8 часов) строились регрессионные модели по типам грунтов.

Для суглинков (13 определений) получена модель:

поверхности ($S_{уд}$) происходит изменение характера смачиваемости частиц грунта, что

сопровождается снижением количества связанной незамерзшей воды и, следовательно, увеличением эквивалентного сцепления. Увеличение степени заполнения объема

пор ММГ незамерзшей водой (Sr) приводит к снижению эквивалентного сцепления.

Для песков (10 определений) получена следующая модель:

$$C_{eq} = 0,018358 - 0,014039 \cdot K_{var} - 0,029649 \cdot W_m, \text{ при } r = 0,73.$$

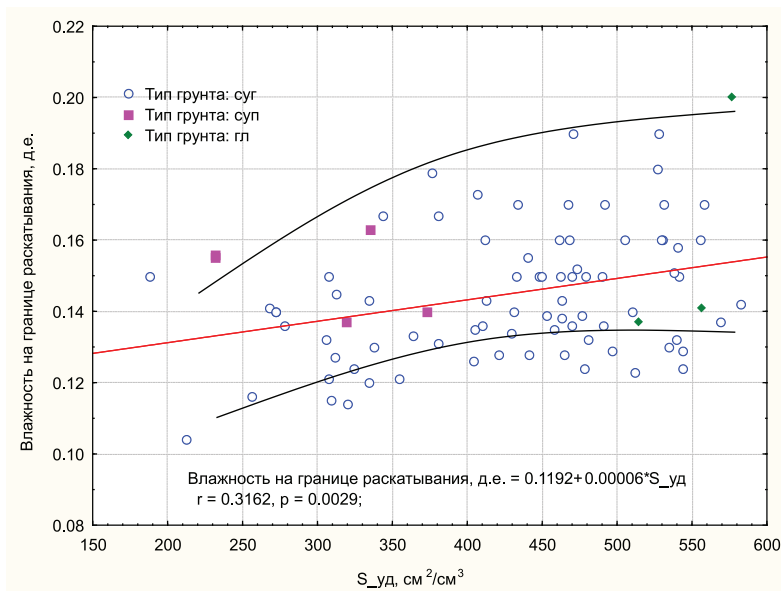


Рис. 2. Корреляционные поля между $S_{уд}$ и влажностью на границе текучести

При снижении однородности песчаных грунтов происходит изменение характера взаимодействия в зонах контакта песчаных зерен. Появление более мелких частиц грунта в зоне контакта приводит к возможности более свободного вращения частиц грунта относительно друг друга, а увеличение M_d уменьшает количество контактов между зёрнами, что приводит к росту локальных напряжений и снижению эквивалентного сцепления. Увеличение влажности между включениями льда W_m приводит к снижению эквивалентного сцепления.

Полученные модели характеризуются высокими множественными коэффициентами корреляции (суглинка $R = 0,72$, пески $R = 0,73$) и могут служить для прогноза эквивалентного сцепления C_{eq} . Близость данных коэффициентов свидетельствует о высокой адекватности и сопоставимой точности статистических моделей.

Таким образом, в ходе выполнения и анализа результатов лабораторных испытаний грунтов были детально рассмотрены стандартные физические свойства грунтов по типам грунта. Рассчитаны и проанализированы дополнительные характеристики грунтов – математическое ожидание диаметра частиц грунта (M_d) и удельная поверхность частиц грунта ($S_{уд}$), не имеющие

широкого распространения в инженерно-геологической практике. Установлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на эквивалентное сцепление C_{eq} грунта, построены статистические модели прогноза C_{eq} с учетом типа грунта.

Список литературы

1. Галкин В.И., Середин В.В., Лейбович Л.О., Копылов И.С., Пушкарева М.В., Чиркова А.А. Оценка эффективности технологий очистки нефтезагрязненных грунтов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 6. – С. 4–7.
2. Лейбович Л.О., Середин В.В., Пушкарева М.В., Чиркова А.А., Копылов И.С. Экологическая оценка территорий месторождений углеводородного сырья для определения возможности размещения объектов нефтедобычи // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 12. – С. 13–16.
3. Пушкарева М.В., Май И.В., Середин В.В., Лейбович Л.О., Чиркова А.А., Вековшинина С.А. Экологическая оценка среды обитания и состояния здоровья населения на территориях нефтедобычи Пермского края // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 2. – С. 40–45.
4. Пушкарева М.В., Середин В.В., Лейбович Л.О., Чиркова А.А. Комплекс санитарно-гигиенических и противоэпидемических мероприятий по охране Тулвинского водозабора // Здоровье населения и среда обитания. – 2011. – № 9. – С. 14–17.
5. Пушкарева М.В., Середин В.В., Лейбович Л.О., Чиркова А.А. Оценка комплекса природоохранных мероприятий для объектов нефтедобычи, находящихся на территории зоны санитарной охраны (ЗСО) поверхностного водозабора //

Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 8. – С. 27–30.

6. Пушкарёва М.В., Середин В.В., Лейбович Л.О., Чиркова А.А., Бахарев А.О. Инженерно-экологическая оценка территории запасов подземных вод в связи с разработкой нефтяных месторождений // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 2. – С. 9–13.

7. Пушкарёва М.В., Середин В.В., Лейбович Л.О., Чиркова А.А., Бахарев А.О. Корректировка границ зон санитарной охраны (ЗСО) питьевого водозабора // Здоровье населения и среда обитания. – 2011. – № 10. – С. 46–48.

8. Середин В.В., Галкин В.И., Пушкарёва М.В., Лейбович Л.О., Сметанин С.Н. Вероятностно-статистическая оценка инженерно-геологических условий для специального районирования // Инженерная геология. – 2011. – № 4. – С. 42–47.

9. Середин В.В., Галкин В.И., Растегаев А.В., Лейбович Л.О., Пушкарёва М.В. Прогнозирование карстовой опасности при инженерно-геологическом районировании территории // Инженерная геология. – 2012. – № 2. – С. 40–45.

10. Середин В.В., Лейбович Л.О., Пушкарёва М.В., Копылов И.С., Хрулев А.С. К вопросу о формировании морфологии поверхности трещины разрушения горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 3. – С. 85–90.

References

1. Galkin V.I., Seredin V.V., Lejbovich L.O., Kopylov I.S., Pushkareva M.V., Chirkova A.A., Ocenka jeffektivnosti tehnologij ochistki neftezagrnennyyh gruntov. Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse, 2012, no. 6, pp. 4–7.

2. Lejbovich L.O., Seredin V.V., Pushkareva M.V., Chirkova A.A., Kopylov I.S., Jekologicheskaja ocenka territorij mestorozhdenij uglevodorodnogo syrja dlja opredelenija vozmozhnosti razmeshhenija obektov neftedobychi. Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse, 2012, no. 12, pp. 13–16.

3. Pushkareva M.V., Maj I.V., Seredin V.V., Lejbovich L.O., Chirkova A.A., Vekovshinina S.A., Jekologicheskaja ocenka sredy obitanija i sostojanija zdorovja naselenija na territorijah neftedobychi Permskogo kraja. Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse, 2013, no. 2, pp. 40–45.

4. Pushkareva M.V., Seredin V.V., Lejbovich L.O., Chirkova A.A., Kompleks sanitarno-gigienicheskikh i protivopej-

demicheskikh meroprijatij po ohrane Tulvinskogo vodozabovra. Zdorovje naselenija i sreda obitanija, 2011, no. 9, pp. 14–17.

5. Pushkareva M.V., Seredin V.V., Lejbovich L.O., Chirkova A.A. Ocenka kompleksa prirodoohrannyh meroprijatij dlja obektov neftedobychi, nahodjashhihsja na territorii zony sanitarnoj ohrany (ZSO) poverhnostnogo vodozabovra. Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse, 2011, no. 8, pp. 27–30.

6. Pushkareva M.V., Seredin V.V., Lejbovich L.O., Chirkova A.A., Baharev A.O., Inzhenerno-jekologicheskaja ocenka territorii zapasov podzemnyh vod v svjazj s razrabotkoj neftnyh mestorozhdenij. Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse, 2013, no. 2, pp. 9–13.

7. Pushkareva M.V., Seredin V.V., Lejbovich L.O., Chirkova A.A., Baharev A.O., Korrekcirovka granic zon sanitarnoj ohrany (ZSO) pitevogo vodozabovra. Zdorovje naselenija i sreda obitanija, 2011, no. 10, pp. 46–48.

8. Seredin V.V., Galkin V.I., Pushkareva M.V., Lejbovich L.O., Smetanin S.N., Verojatnostno-statisticheskaja ocenka inzhenerno-geologicheskikh uslovij dlja specialnogo rajonirovanija. Inzhenernaja geologija, 2011, no. 4, pp. 42–47.

9. Seredin V.V., Galkin V.I., Rastegaev A.V., Lejbovich L.O., Pushkareva M.V. Prognozirovanie karstovoj opasnosti pri inzhenerno-geologicheskome rajonirovanii territorij. Inzhenernaja geologija, 2012, no. 2, pp. 40–45.

10. Seredin V.V., Lejbovich L.O., Pushkareva M.V., Kopylov I.S., Hrulev A.S., K voprosu o formirovanii morfologii poverhnosti treshhiny razrushenija gornyyh porod. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh, 2013, no. 3, pp. 85–90.

Рецензенты:

Середин В.В., д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь;

Ибламинов Р.Г., д.г.-м.н., заведующий кафедрой минералогии и петрографии Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 05.12.2013.