

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 5. С. 156–163.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (5): 156–163.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-5-156-163

EDN: TJYMYO

О ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНСИСТЕНЦИИ И УПЛОТНЕННОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Сергей Гаврилович Колмогоров¹, Петр Леонидович Клемяционок²,
Светлана Сергеевна Колмогорова²

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Россия

²Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность. В основании зданий и сооружений часто оказываются глинистые грунты, строительные свойства которых зависят от многих факторов, одним из них является природная уплотненность грунта. В связи с этим актуально установление природной уплотненности глин и использование полученных данных в строительных классификациях грунтов.

Цель исследования – установление природной уплотненности глин.

Как известно, уплотненность глинистого грунта тесно связана с консистенцией. В настоящей работе приведен анализ взаимосвязи уплотненности и консистенции глинистых грунтов, разных по генезису, с использованием показателя уплотненности грунта В.А. Приклонского. Показано влияние степени водонасыщения глинистого грунта на относительное расхождение коэффициента консистенции от показателя уплотненности для разных по генезису и консистенции грунтов. Отмечено, что для грунтов с коэффициентом водонасыщения меньше единицы коэффициент консистенции отличается от показателя уплотненности. Расхождение растет с понижением коэффициента водонасыщения. Существенно, что значительные расхождения, приближающиеся к единице, могут проявиться и при коэффициенте водонасыщения, равном 0,95 и более.

Результаты. Выполненный анализ показал, что оценка природной уплотненности глинистых грунтов должна базироваться на знании условий их формирования. Исследование различных генетических типов глинистых грунтов с целью установления взаимосвязи природной уплотненности и консистенции позволит более обоснованно подойти к вопросу использования показателя уплотненности грунта в строительных классификациях.

Ключевые слова: показатель уплотненности, глинистый грунт, показатель консистенции, степень водонасыщения

Для цитирования: Колмогоров С.Г., Клемяционок П.Л., Колмогорова С.С. О взаимосвязи показателей консистенции и уплотненности глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 5. С. 156–163. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-156-163. EDN: TJYMYO

ORIGINAL ARTICLE

RELATIONSHIP BETWEEN CONSISTENCY AND COMPACTION OF CLAY SOILS

Sergey G. Kolmogorov¹, Petr L. Klemyatsionok²,
Svetlana S. Kolmogorova²

¹Saint-Petersburg State Agrarian University,
Saint-Petersburg, Pushkin, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. Clay soils are often found under building foundations, construction properties of which depend on many factors. One of them is the natural soil compaction, which is relevant in the construction classification of soils.

This paper analyzes the relationship between the consistency and compaction of clay soils of different genesis and consistency using the Priklonskii soil compaction index. Water saturation of clay soil affects the relative discrepancy between the consistency coefficient and compaction index for soils of different genesis and consistency. It is noted that for soils with the water saturation coefficient lower than one, the consistency coefficient differs from the compaction index. This difference increases with decreasing water saturation coefficient. It is essential that significant differences can also appear when the water saturation coefficient is equal to 0.95 or more, approaching to unity.

It is shown that the assessment of the natural compaction of clay soils should be based on their formation conditions. A study of various genetic types of clay soils affecting natural densification and consistency provides a reasonable approach to use of soil densification in the construction classification of soils.

Keywords: compaction index, clay soil, consistency index, water saturation

For citation: Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S. Relationship between consistency and compaction of clay soils. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (5): 156–163. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-156-163. EDN: TJYMYO

Проблема установления природной уплотненности глин и использования этого показателя в строительных классификациях грунтов длительное время не привлекала должного внимания исследователей.

Систематическое рассмотрение природного процесса уплотнения глин проведено в работе Н.Я. Денисова, где анализируется влияние на уплотняемость (и ее результат – уплотненность грунтов) различных факторов: глубины залегания, состава осадка и глин, среды и условий уплотнения.

Развивая представления о нормально уплотнённых, недоуплотненных и переуплотненных глинах, следует отметить, что два последних состояния относятся к энергетически неустойчивым, способным к объемным деформациям при изменении условий среды – просадкам и набуханию [1, 2, 3].

С учетом способа определения используемого в формуле показателя уплотненности грунтов В.А. Приклонского K_{dp} , коэффициентов пористости при влажностях, равных пределам текучести и пластичности, оказывается справедливым соотношение

$$K_{dp} = \frac{\left(w_L - \frac{w}{S_r} \right)}{w_L - w_p}.$$

Таким образом, для полностью водонасыщенного грунта ($S_r = 1$) показатель уплотненности K_{dp} совпадает с коэффициентом консистенции:

$$J_C = \frac{(w_L - w_p)}{J_p}.$$

Это положение подтверждено при рассмотрении известных данных по коренным глинам и четвертичным глинистым грунтам [4], собранных в две выборки в количестве 16 и 25 образцов соответственно. В то же время отмечено, что для грунтов с коэффициентом водонасыщения меньше единицы коэффициент консистенции отличается от показателя уплотненности, причем обычно $J_C > K_{dp}$, так что относительное расхождение $\delta = \frac{J_C - K_{dp}}{J_C}$ (далее для

краткости называемое «ошибкой») положительно и растет с понижением коэффициента водонасыщения. Существенно, что значительные «ошибки», приближающиеся к единице, могут проявиться при $S_r = 0,95$ и более.

Возможным фактором увеличения «ошибки» можно предполагать использование усредненных данных в рассмотренных грунтах, обычно приводящихся в виде интегралов возможных изменений показателей. Для того, чтобы исключить этот фактор, были рассмотрены результаты непосредственного определения показателей состава и состояния глинистых грунтов нескольких генетических типов для района СПб, приведенных в отчете ЛенТИСИЗа [5]. На рис. 1 показаны результаты проверки сходимости J_C и K_{dp} для малой выборки ($n = 8$) образцов мягкопластичного суглинка f_{qIII} , отобранных с глубины 17,6–32,5 м. Все образцы полностью водонасыщенные, кроме одного со значением $S_r = 0,97$. Этот образец и дает наибольшее отклонение от диагонали координатного угла. При этом расчет средних величин дает равенство $\overline{J_C} = \overline{K_{dp}} = 0,33$.

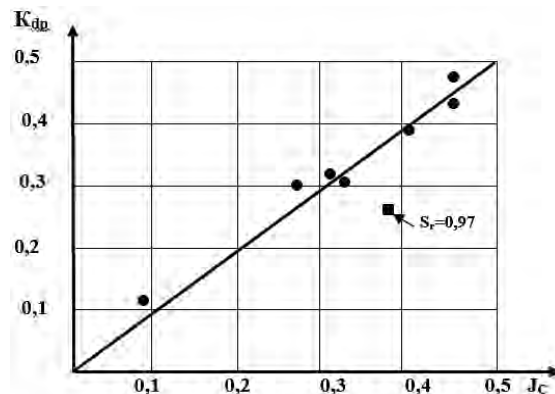


Рис. 1. К проверке равенства $K_{dp} = J_C$ для суглинков мягкопластичных f_{qIII} ($n = 8$)

Fig. 1. Verification of the equality $K_{dp} = J_C$ for soft-plastic loams ($n = 8$)

На рис. 2 приведены аналогичные результаты для выборки большего объема ($n = 41$) ледниковых моренных отложений gq_{III} , представленных суглинками тугопластичными с прослоями мягкопластичных, отобранных с глубин 15–45 м [6, 7]. Суглинки полностью водонасыщенные, за исключением восьми образцов с $S_r = 0,95–0,96$. Как видно из рисунка, именно эти образцы дают наибольшее отклонение от равенства $J_C = K_{dp}$.

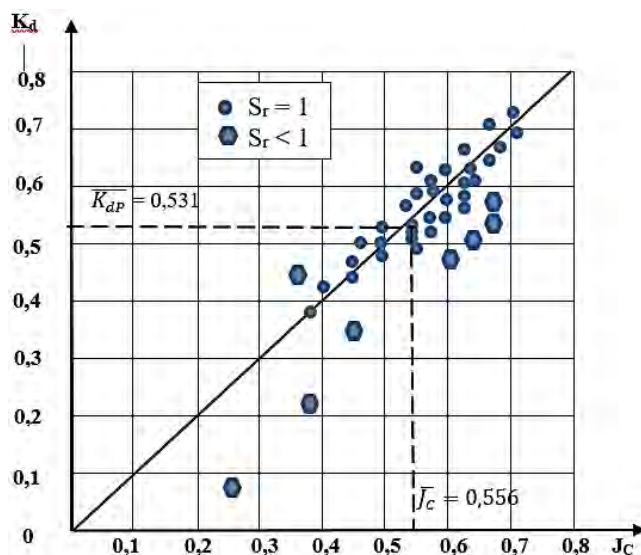


Рис. 2. К проверке равенства $K_{dp} = J_C$ для моренных суглинков q_{III} ($n = 41$)

Fig. 2. Verification of the equality $K_{dp} = J_C$ for moraine loams ($n = 41$)

Количественно влияние водонасыщенности усматривается из таблицы, в которой приведены результаты раздельной обработки выборки при $S_r = 1$ и $S_r < 1$, а также общей. При полном водонасыщении равенство $J_C = K_{dp}$ практически выполняется, и «ошибка» составляет всего 0,5 %. При $S_r < 1$ расхождение средних величин («ошибка») возрастает до 22,5 %, и резко увеличиваются коэффициенты вариации J_C и особенно K_{dp} . В объединенной выборке отмеченные различия сглаживаются, и ошибка оказывается в пределах обычного разброса данных.

Результаты статистической обработки выборки

Statistical selection results

Статистическая оценка	При $S_r = 1$, $n = 33$		При $S_r < 1$, $n = 8$		Общая $n = 41$	
	J_C	K_{dp}	J_C	K_{dp}	J_C	K_{dp}
Среднее	0,567	0,564	0,511	0,396	0,556	0,531
Среднее квадратичное отклонение	0,083	0,080	0,156	0,179	0,100	0,123
Коэффициент вариации, %	14,7	14,2	30,5	45,2	18,2	23,0
«Ошибка» δ , %	0,5		22,5		4,5	

На рис. 3 приведены экспериментальные данные по итогам технического отчета об инженерно-геологических изысканиях Санкт-Петербурга [5] еще для одного типа глинистых отложений, относящихся к неуплотненным или очень слабо уплотненным, это ленточные суглинки и глины (*lgqIII*). Можно заметить, что и границы, и средние значения J_C и K_{dp} практически совпадают, а неполное водонасыщение приводит к большим «ошибкам» и в отрицательной области.

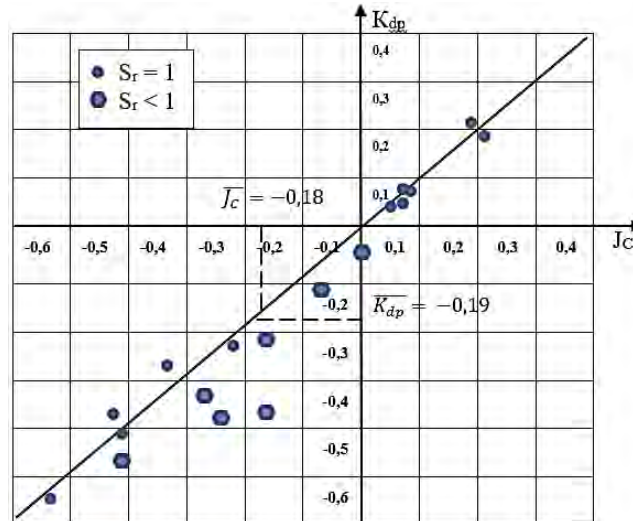


Рис. 3. К проверке равенства $K_{dp} = J_C$ для озерно-ледниковых суглинков и глин *lgqIII*

Fig. 3. Verification of the equality $K_{dp} = J_C$ for lake-glacial loams and clays

Некоторые представления о причине возможных больших «ошибок» при водонасыщенности, близкой к единице, но меньше ее, можно получить, рассмотрев формулы для абсолютной и относительной «ошибок»:

$$J_C - K_{dp} = \frac{w_L - w}{J_p} - \frac{w_L - \frac{w}{S_r}}{J_p} = \frac{\frac{w}{S_r} - w}{J_p} > 0; \quad (1)$$

$$\delta = \frac{J_C - K_{dp}}{J_C} = \frac{\frac{1 - S_r}{S_r} w_{от}}{1 - w_{от}}, \quad (2)$$

где $w_{от} = w/w_L$ – относительная влажность.

Соотношение для абсолютной «ошибки» (1) показывает, что для неводонасыщенных грунтов $J_C > K_{dp}$. Обратное неравенство может быть следствием «ошибок» при определении показателей или связано с влиянием структуры и структурных связей. Соотношение (2) показывает существенное влияние относительной влажности; приближение последней к единице может дать ощутимую «ошибку» даже при $S_r = 0,99$.

Например, для «выброса» на рис. 1: $J_C = 0,38$; $K_{dp} = 0,28$; $S_r = 0,97$; $w_{от} = 0,90$. По (2) получаем: $\delta = (0,03/0,97)(0,90/0,10) = 0,278 = 27,8 \%$. Расчет по

непосредственным данным дает близкую величину: $(0,38 - 0,28)/0,38 = 0,263 = 26,3 \%$. Вообще расчет по формуле (2) несколько завышает «ошибку».

Для наиболее заметного «выброса» на рис. 3 имеем $J_C = -0,25$; $K_{dp} = -0,39$; $S_r = 0,94$; $w_{от} = 1,10$ и по (2) получаем $\delta = (0,06/0,94)(1,10/-0,10) = 0,702 = 70,2 \%$. По непосредственному расчету $\delta = (-0,25 + 0,39)/0,25 = 0,560 = 56 \%$. Таким образом, оценки (1) и (2) следует рассматривать как максимально возможные.

На рис. 4 показаны результаты, вполне аналогичные уже рассмотренным, но относящиеся к глинистым грунтам Западной Сибири – северо-запада Обь-Иртышского междуречья. Данные по показателю уплотненности взяты из статей А.И. Воробьева [8], где они приведены вместе с показателями состава и состояния грунтов, по которым нами рассчитаны показанные на рис. 4 значения S_r и J_C . В приведенном анализе при неполном водонасыщении точки располагаются ниже диагонали координатного угла, а полную водонасыщенность имеют три грунта: при $S_r = 1$ соответствующая точка – на диагонали; при $S_r = 1,05$ – ниже ее и при $S_r = 1,06$ – выше. Последняя точка относится к полутвердому валунному суглинку с показателями $J_C = 0,75$; $K_{dp} = 0,9$; $w_{от} = 0,71$. «Ошибка» δ равна $(0,75-0,90)/0,75 = -0,20 = -20 \%$, а ее оценка по формуле (2) равна $-13,9 \%$.

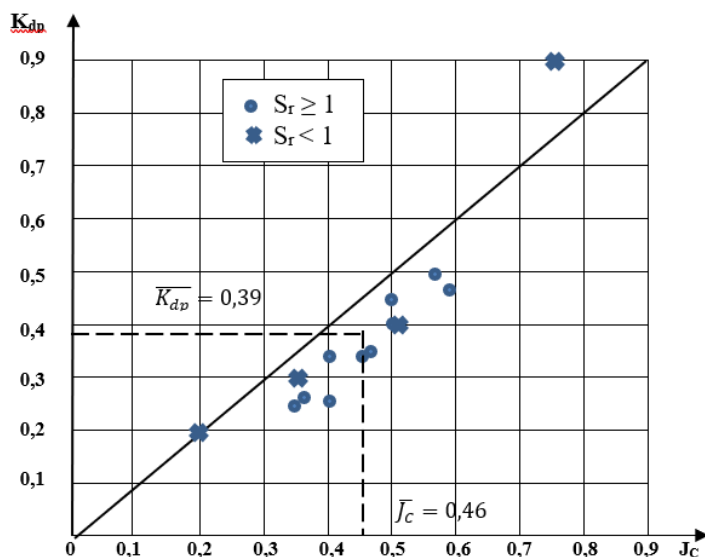


Рис. 4. К проверке равенства $K_{dp} = J_C$ для грунтов Западной Сибири
Fig. 4. Verification of the equality $K_{dp} = J_C$ for soils of Western Siberia

Обычно значения $S_r > 1$ связывают с погрешностями определения влажности, плотности минеральных частиц и коэффициента пористости. Однако при высоких значениях относительной влажности такое «перенасыщение» представляется вполне вероятным. В приведенных на рис. 3 данных по озерно-ледниковым грунтам района СПб относительная влажность не превышает 1,21. В классификации иольдиевых глин для дорожного строительства выделен класс глин с $w_{от} > 2,5$ [9]. Возможно, в таких грунтах положение $S_r > 1$ окажется связанным не только со случайными погрешностями определения показателей.

Результаты анализа показали влияние степени водонасыщения глинистого грунта во взаимосвязи уплотненности и консистенции. Для дальнейшего изучения данного вопроса необходимо исследовать глинистые грунты разных генетических типов, что позволит более обоснованно подойти к вопросу об использовании показателя уплотненности грунта в строительных классификациях грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Денисов Н.Я.* О природе деформаций глинистых грунтов. Москва : Речиздат, 1951. 200 с.
2. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений. Санкт-Петербург : Геореконструкция, 2015. 282 с.
3. *Колмогоров С.Г., Клемяционок П.Л., Колмогорова С.С.* Физическая сущность прочности глинистых грунтов в зависимости от их состояния // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : материалы Международной научно-практической конференции, 24–26 января 2019. Ч. II. Санкт-Петербург : СПбГАУ, 2019. С. 19–21.
4. *Лысенко М.П.* Глинистые грунты Русской платформы. Москва : Недра, 1986. 252 с.
5. *Технический отчет* об инженерно-геологических изысканиях / Ленинградский трест инженерно-строительных изысканий ЗАО ЛенТИСИЗ. Санкт-Петербург, 2004. 57 с.
6. *Приклонский В.А.* Грунтоведение. Ч. 1. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Гостеолтехиздат, 1955. 431 с.
7. *Трофимов В.Т., Королев В.Т., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиянгиров Р.С.* Грунтоведение. 6-е изд., перераб. и доп. Москва : МГУ, 2005. 1024 с.
8. *Воробьев А.И.* О формировании физико-механических свойств глинистых пород северо-запада Обь-Иртышского междуречья // Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения в Сибири. Вып. 152. Новосибирск, 1974. С. 27–29.
9. *Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д.* Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. Москва : Транспорт, 1976. 271 с.

REFERENCES

1. *Denisov N.Ya.* On the nature of deformations of clay soils. Moscow: Rechizdat, 1951. 200 p. (In Russian)
2. *Dashko R.E.* Engineering-geological analysis and assessment of water-saturated clay rocks as structure foundations. Saint-Petersburg: Institute "Georeconstruction", 2015. 282 p. (In Russian)
3. *Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S.* Physical essence of clay soil strength depending on their condition. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Scientific Support of Agro-Industrial Complex Development in Conditions of Import Substitution'*, January 24–26, 2019, Part II. St. Petersburg, 2019. Pp. 19–21. (In Russian)
4. *Lysenko M.P.* Clay soils of the East European Craton. Moscow: Nedra, 1986. (In Russian)
5. Technical report on engineering-geological surveys. Leningrad Trust for Engineering and Construction Surveys ZAO LenTISIZ, Saint-Petersburg, 2004. 57 p. (In Russian)
6. *Prikloonsky V.A.* Ground science. Part 1. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1955. 431 p. (In Russian)
7. *Trofimov V.T., Korolev V.T., Voznesensky E.A., Golodkovskaya G.A., Vasilchuk Yu.K., Ziangirov R.S.* Soil science, 6th ed. Moscow, 2005. 1024 p. (In Russian)
8. *Vorobyov A.I.* Formation of physical and mechanical properties of clay rocks in the north-west of the Ob-Irtysh interfluv. In: *Engineering-geological conditions and features of foundation construction in Siberia*. Novosibirsk, 1974. No. 152. Pp. 27–29. (In Russian)
9. *Evgeniev I.E., Kazarnovsky V.D.* Subgrades on soft soils. Moscow: Transport, 1976. 271 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Колмогоров Сергей Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское ш., 2, Kolmogorovsg@list.ru

Клемяционок Петр Леонидович, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Petr.1940@list.ru

Колмогорова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovass@yandex.ru

Authors Details

Sergey G. Kolmogorov, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State Agrarian University, 2, Petersburgskoe Shosse, 196601, Saint-Petersburg, Pushkin, Russia, Kolmogorovsg@list.ru

Petr L. Klemysionok, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Petr.1940@list.ru

Svetlana S. Kolmogorova, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovass@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.07.2023
Одобрена после рецензирования 19.09.2023
Принята к публикации 21.09.2023

Submitted for publication 26.07.2023
Approved after review 19.09.2023
Accepted for publication 21.09.2023