

УСКОРЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАСКАТЫВАНИЯ ГРУНТА

Смоляницкий Л. А.

Канд. технич. наук, доцент Российского государственного технического университета путей сообщения (РГОТУПС), Воронежский филиал

Граница раскатывания грунта является важной классификационной характеристикой. Ее определение стандартным способом трудоемко и включает органолептические приемы, снижающие точность измерения. Кроме того, глины каолинитового состава не раскатываются в жгутики, как это предусмотрено стандартом. В работе предложен принципиально новый ускоренный способ определения влажности, соответствующей границе раскатывания, основанный на свойстве глинистого грунта различно увлажняться после высыхания в зависимости от его влажности до высыхания. Метод рекомендуется для использования при инженерно-геологических изысканиях под строительство и при выполнении инженерно-геологической съемки территорий.

Стандарт (ГОСТ 5180-84) на определение границ текучести и раскатывания, которые для связных грунтов являются основными классификационными характеристиками, включают органолептические приемы, в частности визуальные. Это его существенный недостаток. Границы пластичности для классификации глинистых грунтов были предложены Аттенбергом еще в 1912 году [3] и с некоторыми усовершенствованиями применяются до сих пор. Это объясняется тем, что они отражают существенные объективные свойства глинистого грунта. Так, на границе текучести подвижная тиксотропная глинистая масса приобретает прочность (76 г/см²) и становится грунтом. На границе раскатывания капиллярная вода теряет сплошность, превращаясь в капиллярно-разобленную воду на контактах между минеральными частицами. Указанные «границы» однозначны для каждого глинистого грунта и являются его характеристиками. В данной статье автором рассматривается только определение границы раскатывания.

При раскатывании грунта на жгутиках появляются поперечные трещины потому, что влажность грунта на поверхности жгутика достигает границы усадки, возникают растягивающие напряжения в этом слое, разрывающие грунтовый жгутик с поверхности. При раскатывании на влажном материале, например на бумаге или на ткани, трещинки появляются быстрее, чем при раскатывании на стекле или на пластике, так как в первом случае поверхностный слой грунта на жгутике быстрее обезвоживается. Так как на результат испытания влияет материал, на котором жгутики грунта раскатываются,

стандарт предусматривает раскатывание на невлажном материале (стекле или пластике). Выполненные автором испытания глинистых грунтов с известным минералогическим составом показали, что на образцах каолинистых глин поперечные трещинки не появляются вообще, так как удаление влаги происходит практически одновременно во всем объеме. Появляются иногда продольные трещины (жгутики разрушаются при перекачивании). Такое явление имело место даже в каолинистой глине с границей текучести 52 %. Граница раскатывания, установленная по идентификационной кривой [1, 2], составила 36 %. Поперечные трещинки появляются, когда в составе глинистой фракции имеется монтмориллонитовая глина в количестве не менее 10 % (от объема глинистой фракции). В процессе раскатывания грунта в жгутик было замечено, что иногда первые трещинки могут исчезнуть, а потом появиться снова, при этом влажность уменьшится на 2-3 % у суглинков, у жирных глин — до 6 %. В процессе опыта, когда влажность грунта еще выше границы раскатывания, происходит его налипание на стекло или пластик. Поэтому, влажность грунта на границе раскатывания всегда ниже границы липкости грунта.

На результат испытания влияет скорость обезвоживания грунта при раскатывании жгутика, зависящая от температуры ладони испытателя, то есть от толщины кожи на ладони и ее нежности. Влияет и быстрота перемещения ладони (эмоциональное настроение испытателя), сухость кожи. В результате сложности определения границы раскатывания в ГОСТе появилось дополнение, разрешающее определять влажность грунта как границу раскатывания методом прессования (так определя-

ется максимальная молекулярная влагоемкость). Заменять границу раскатывания максимальной молекулярной влагоемкостью (по нашему мнению) для многих разновидностей грунтов совершенно не допустимо. В некоторых изыскательских организациях границу раскатывания грунта находят путем корреляции с границей текучести, установленной регрессивным анализом для конкретных ранее изученных грунтов подобного генезиса.

В данной работе рассматривается принципиально новый способ определения границ раскатывания грунта, максимально исключающий органолептические приемы.

В указанных выше публикациях приведены предыдущие разработки автора по определению границы раскатывания грунта с помощью прибора «Грунтомер» (в работе [1] он назывался «Релаксометром») с использованием идентификационных кривых. Это достаточно точный способ, так как влажность, соответствующая границе раскатывания на идентификационной кривой представлена сильным экстремумом — минимумом. В настоящей работе предлагается еще более простой ускоренный (экспресс) способ определения влажности, соответствующей границе раскатывания также с использованием прибора «Грунтомер».

В основу метода положено, выявленное автором, ранее не известное явление, которое условно назо-

вем «память грунта». Оно заключается в следующем. Если образец глинистого грунта был высушен в сушильном шкафу (при температуре 105-110 градусов), а затем увлажняется под давлением в приборе «Грунтомер», то он приобретет вполне конкретную влажность, которая зависит от того, какую влажность имел образец грунта до его высушивания в сушильном шкафу. Возможно, это связано с особенностями процесса ликвидации водных оболочек, окружающих глинистые частицы. При этом, если влажность грунта *до сушки была выше влажности соответствующей границе раскатывания*, его увлажнение имеет постоянное значение (для каждого образца) и не зависит от конкретного значения влажности до сушки. Если же влажность грунта *до сушки была ниже влажности, соответствующей границе раскатывания*, например, грунт предварительно медленно подсыхал при комнатной температуре до помещения его в сушильный шкаф, то при увлажнении после сушки достигается меньшее значение влажности и само увлажнение происходит медленнее.

Это явление продемонстрируем на результатах испытаний шести различных грунтов в приведенных ниже таблицах. В таблицах обозначены в процентах влажности: W_a — произвольные значения влажности ниже границы раскатывания до сушки, W_b — произвольные значения влажности выше границы раскатывания до сушки, W_1 — влажность грунта, имевшего до сушки влажность W_a , достигнутую в приборе «Грунтомер» при увлажнении в течение 10 мин под давлением 100 кПа, W_2 — влажность грунта, имевшего до сушки влажность W_b , достигнутую в приборе «Грунтомер» при увлажнении в течение 10 мин под давлением 100 кПа. Вода попадает в образцы грунта из водонасыщенных влагоемких оболочек, в которые они

Таблица 1

Грунт 03а (влажность на границе текучести 32,4 %, раскатывания 18,7 %)

№ пп	W_a	W_1	W_b	W_2
1	16,1	13,2	22,0	14,6
2	16,5	10,8	24,6	16,0
3	16,7	11,2	19,8	16,9
4	16,5	12,0	19,9	17,4
5	15,9	12,5	21,1	15,5
6	15,4	13,2	21,4	14,9
7	16,1	12,2	23,2	14,7
8	16,8	11,7	22,2	14,7
9	16,7	13,3	20,3	15,1
10	15,7	13,6	21,8	12,3
11	15,8	14,2	21,5	13,5
12	16,1	13,2	22,9	12,0
13	16,6	15,2	20,6	13,5
14	15,0	12,9	24,8	15,9
15	14,3	13,9	25,6	16,8
Средн. знач.	16,0	12,9	22,1	14,9

Среднеквадратичное отклонение значений W_1 — 2,35%, коэффициент вариации — 0,28. Соответственно для значений W_2 — 2,69 % и 0,36.

Таблица 2

Грунт 112. (Границы: текучести 39,9%, раскатывания 29,9%)

№ пп	W_a	W_1	W_b	W_2
1,0	17,5	19,9	25,1	19,8
2,0	19,9	18,9	26,0	19,1
3,0	13,7	19,8	33,2	20,1
4,0	21,9	18,8	34,6	20,7
Средн. знач.	18,3	19,4	29,7	19,9

Среднеквадратичное отклонение значений W_1 — 1,0%, коэффициент вариации — 0,05. Соответственно для значений W_2 — 1,15 % и 0,06.

Таблица 3

Грунт 62. (Границы: текучести 37,8%,
раскатывания 15,4%)

№ пп	W_a	W_1	W_6	W_2
1	14,3	10,7	18,2	11,1
2	13,9	10,8	16,8	12,1
3	14,3	10,4	19,4	11,7
4	14,4	10,7	21,0	12,0
5	14,5	10,3	9,0	11,6
6	15,3	10,6	27,5	11,1
7	15,4	10,9	26,2	11,0
8	15,4	10,2	23,7	10,7
Средн. знач.	14,7	10,6	20,2	11,4

Среднеквадратичное отклонение значений W_1 — 0,66, коэффициент вариации — 0,06. Соответственно для значений W_2 — 0,80% и 0,07.

Таблица 5

Грунт 5-Э. (Границы: текучести 83,9%,
раскатывания 31,4%)

№пп	W_a	W_1	W_6	W_2
1	29,8	20,0	36,7	23,2
2	30,0	20,9	43,2	23,0
3	29,2	19,2	55,1	23,0
4	28,0	19,8	44,7	22,0
5	29,8	19,0	57,2	20,1
6	31,5	21,9	38,8	22,1
7	30,7	22,2	39,2	21,8
8	31,9	22,5	40,2	21,6
Средн. знач.	30,1	20,7	44,4	22,2

Среднеквадратичное отклонение значений W_1 — 3,66%, коэффициент вариации — 0,18. Соответственно для значений W_2 — 2,68% и 0,12.

помещаются перед установкой в прибор. (Перед приложением длительного давления в течение 10 мин интенсивностью 100 кПа образец обжимается давлением 400 кПа в течение 15 сек с целью создания хорошего контакта образца с влагоемкой оболочкой и для уменьшения величины релаксации напряжений). В приборе одновременно испытываются 5-6 образцов грунта.

В некоторых случаях в очень легких грунтах (табл. 6) или в каолиновых глинах описанная выше «память» грунта не проявляется или проявляется слабо. Однако, как будет доказано дальнейшими исследованиями, использование разных влажностей

Таблица 4

Грунт 61. (Границы: текучести 21,4%,
раскатывания 15,4%)

№ пп	W_a	W_1	W_6	W_2
1	14,3	10,7	17,5	11,5
2	14,4	10,3	16,9	10,7
3	14,3	10,7	19,1	11,0
4	13,9	10,8	18,6	11,1
5	14,5	10,4	17,2	12,0
6	15,1	11,0	17,8	11,7
Средн. знач.	14,4	10,7	17,9	11,3

Среднеквадратичное отклонение значений W_1 — 0,59, коэффициент вариации — 0,06. Соответственно для значений W_2 — 1,89% и 0,17.

Таблица 6

Грунт 26 (границы: текучести 17,6%,
раскатывания 10,9%)

№ пп	W_a	W_1	W_6	W_2
1	9,3	9,7	11,5	9,1
2	8,8	7,1	12,8	8,7
3	8,7	8,5	12,2	8,2
4	8,3	8,2	13,3	7,7
5	8,2	7,0	11,4	7,4
6	9,4	8,3	12,0	8,0
7	10,4	8,7	11,6	8,1
8	9,6	8,5	12,4	7,5
9	10,1	8,4	13,1	7,5
10	9,9	7,8	11,8	7,9
11	9,4	8,3	11,7	7,6
Средн. знач	9,3	8,2	12,2	8,0

Среднеквадратичное отклонение значений W_1 — 2,35%, коэффициент вариации — 0,28. Соответственно для значений W_2 — 2,69% и 0,36.

той грунта (до высыхания в сушильном шкафу) оказалось плодотворным.

Были приняты следующие обозначения: W — влажность образца грунта ниже границы раскатывания до его сушки в сушильном шкафу (в таблицах 1-6 эта влажность обозначена W_6 , выше границы раскатывания — W_a), W_1 — влажность этого же образца после его увлажнения в приборе в течение 10 мин по давлением 100 кПа, W_2 — влажность другого образца этого же грунта после его увлажнения в приборе в течение 10 мин под давлением 100 кПа, имеющего влажность до сушки выше, чем граница раскатывания.

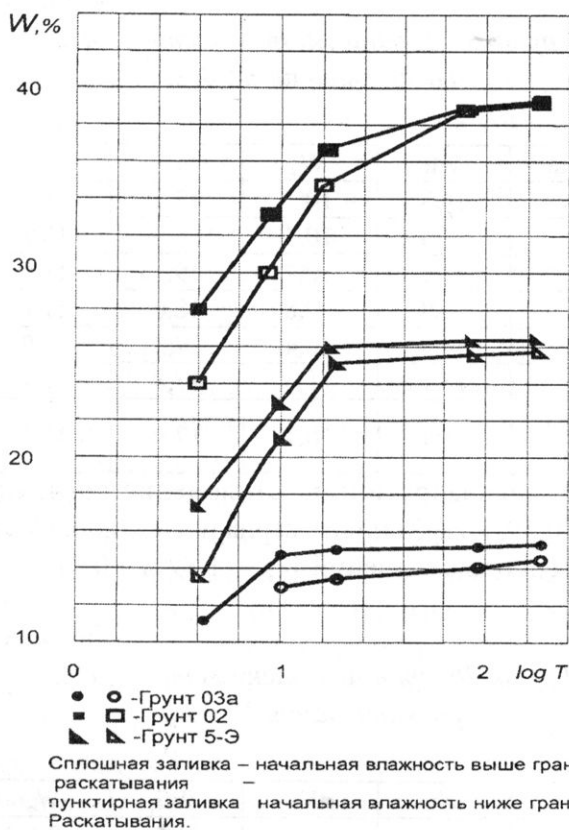
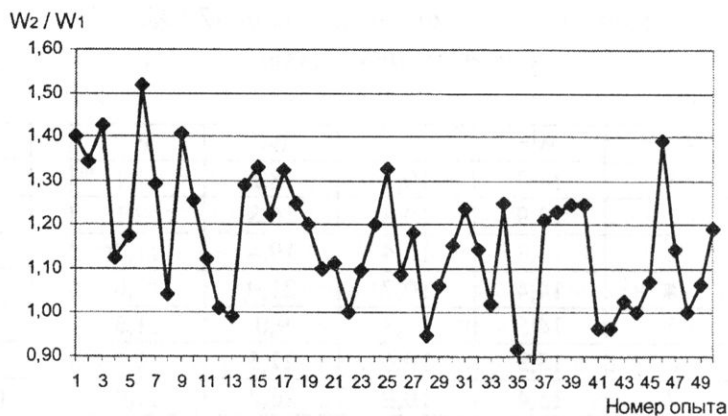


Рис. 1. Увлажнение образцов во времени

Проверка проявления «памяти» грунта выполнялась и другим методом.

Были изготовлены в шаблоне прибора «Грунтомер» обычные по размеру стандартизированные образцы (диаметром 35 мм и толщиной 3 мм) трех различных грунтов при влажностях ниже и выше границы раскатывания. Часть образцов после сушки увлажнялась в приборе 5 мин, другая 10 мин, третья — 20 мин, четвертая — 100 мин, и последняя 180 минут. Результаты испытаний показаны на рис. 1. Как видно из приведенного рисунка, увлажнение образцов грунта в приборе «Грунтомер» завершается практически в течение 20 минут. При этом заметно, что с увеличением продолжительности увлажнения эффект «памяти» грунта уменьшается (уменьшается отставание значений W_1 от W_2). Поэтому было целесообразно ограничиться продолжительностью увлажнения 10 мин. Конечная влажность совпадает только в грунте 02 (каолиновая глина с границами текучести 52 %, раскатывания 36 %). На рис. 2 приведены для 50 произвольных грунтов (от супесей до жирных глин) отношения W_1 к W_2 . Как видно из графика, в подавляющем большинстве опытов это отношение больше 1, среднее значение 1,16. Это позволяет сделать вывод о том, что указанное явление имеет место и не является ошибкой опыта. Таким образом, была

Рис. 2. Соотношение между W_2 и W_1

принята следующая принципиальная схема (Рис. 3) построения формулы для расчета границы текучести грунта по результатам его увлажнения в приборе «Грунтомер».

В точке с координатами W_p и W_2 линии влажностей пересекутся, поэтому решение системы уравнений двух линий, пересекающихся в точке с указанными выше координатами дает выражение для W_p :

$$W_p = \varepsilon W_1 + W_2 - W_1 \quad (1),$$

где W_p — граница раскатывания грунта, ε — тангенс угла наклона линии W_1 к оси абсцисс линии W .

Неизвестную величину ε найдем следующим образом. Для образцов, использованных в построении рис. 2 с известными границами раскатывания, установленными по стандарту, рассчитаны по отношению W_1 к W фактические значения ε и построен график зависимости ε от W_1 к W (Рис. 4).

Как видно из этого графика, между указанными величинами имеется взаимосвязь, для которой найдено уравнение регрессии:

$$\varepsilon = 0,44 + 0,87 W_1 / W_2 \quad (2).$$

Подставим уравнение (2) в уравнение (1) и получим выражение для расчета влажности на границе раскатывания W_p :

$$W_p = 0,44 W + W_2 - 0,13 W_1 \quad (3).$$

С целью повышения точности определения значений влажности, соответствующей границе раскатывания, были унифицированы приемы в проведении опыта, как это принято во всех стандартах на определение характеристик грунтов. Как было указано выше, влажность на границе раскатывания всегда ниже влажности грунта на границе липкости, но она выше влажности W_2 . Целесообразно перед сушкой довести влажность грунта до «условной» (не по стандарту) границы липкости. Назовем «условной границей липкости» такую влажность, при которой образец перемятого грунта, изготовленный



Рис.3. Расчетная схема для вывода формулы границы раскатывания

в шаблоне прибора «Грунтомер» (диаметр 35 мм, толщина 3 мм) прилипает к тонкому гибкому пластику следующим образом. Образец грунта размещается на пластинке из гибкого пластика размером 100x100 мм по середине, прижимается легким давлением к нему ладонью до полного контакта поверхностей. Пластик с образцом переворачивается образцом вниз и медленно изгибается по диагонали до совмещения углов. Если образец не падает в течение 30 секунд, удерживаясь частью контактной плоскости, то его влажность не ниже условной границы липкости (тест 1). Если образец падает, влажность недостаточная. Когда первый тест выполняется, пластик переворачивается в первоначальное положение и освобождается от образца скручиванием пластика. Если это достигается без нарушения целостности и искривления образца, то выполнено второе условие (тест 2). На пластике остается очень тонкий (почти след) слой грунта. Если образец деформируется, влажность грунта слишком высока.

Оказалось, что выполнить эти условия очень просто, так как масса двух образцов составляет

всего 12-15 г и на дополнительное увлажнение или подсушивание грунта требуется всего 2-3 минуты. Итак, исходная влажность соответствует условной границе липкости. Один образец взвешивается и на крышке бюкса помещается в сушильный шкаф, другой образец помещается на лист бумаги и подсыхает при комнатной температуре 1,5—2 часа, после чего он взвешивается и также помещается в сушильный шкаф. Одновременно готовится к испытанию 12-18 образцов разных грунтов.

Для грунтов с большим содержанием песчаных фракций крупнее 1 мм, которые отсеиваются по стандарту перед определением границ пластичности, но не удаляются в нашем методе, можно ввести поправку + 3 % влажности (примерно на эту величину завышается граница раскатывания, установленная по стандарту, с заметным содержанием крупных песчаных фракций). Такие грунты легко идентифицируются по шероховатой поверхности и скрипу при формировании образцов в шаблоне. Графическое сравнение значений влажности грунта на границе раскатывания, определенных по предлагаемой методике и по стандарту для 137 различных грунтов показано на рис. 5. В эту выборку не вошли образцы, использованные ранее для обоснования формулы (3).

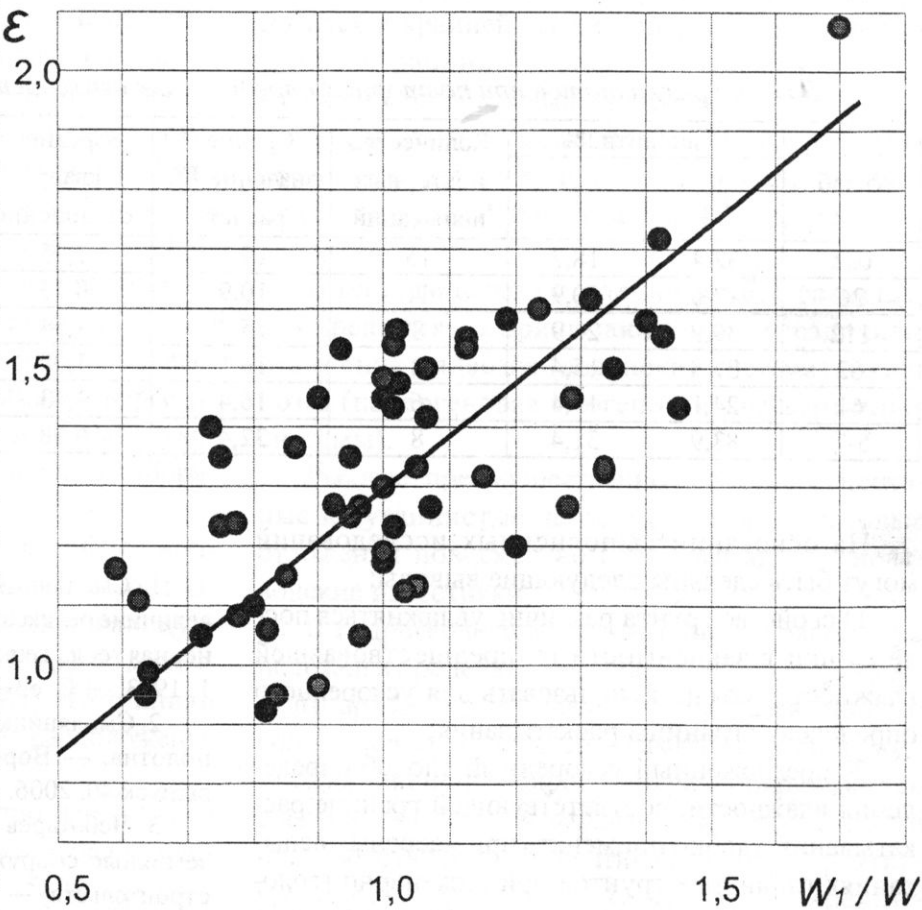


Рис.4. График зависимости ϵ от W_1/W

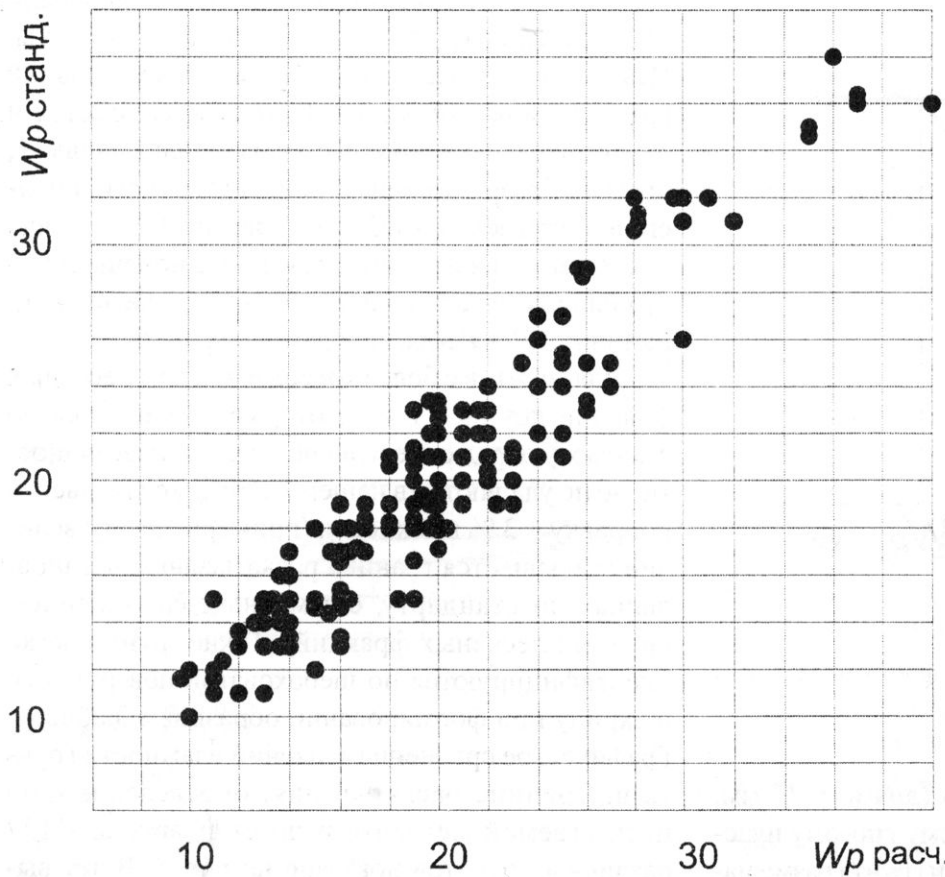


Рис. 5. Зависимость между определенными по предлагаемой методике и по стандарту значениями влажности на границе раскатывания, %

Уравнение регрессии для зависимости, показанной на этом рисунке имеет вид: $W_p \text{ ст.} = 0,94 W_p \text{ расч.} + 1$; коэффициент корреляции между значениями, определенными по стандарту и по предлагаемому способу по 137 параллельным определениям составил 0,94; отклонения по абсолютным значениям находится в основном в пределах 2% абсолютного значения влажности, что соизмеримо с погрешностью определения границы раскатывания по стандарту.

Разброс результатов повторных определений границы раскатывания по предлагаемому методу для шести различных грунтов приведен в таблице 8.

В течение рабочего дня предложенным способом можно испытать до 50 разных грунтов. Время полной сушки тонкого плоского образца не превышает 20-30 минут.

Таблица 8

Разброс результатов при повторных определениях влажности границ раскатывания..

№ лаб.	Стандартн. %		Количество повторных испытаний	Среднее значение W_p расчет.	Средне-квадр. отклонение	Кoeff. вариации	$\Delta W = W_p \text{ расч.} - W_p \text{ станд.}$
	W_L	W_p					
03а	32,4	18,7	15	19,1	1,55	0,08	0,4
26	17,6	10,9	11	10,9	0,77	0,07	0,0
112	39,9	24,9	8	25,2	1,54	0,06	0,3
62	37,8	15,4	8	16,5	1,00	0,06	1,1
61	24,1	15,4	6	16,4	1,43	0,09	1,0
5-Э	83,9	31,4	8	32,4	0,98	0,03	1,0

На основании выполненных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1) свойство грунта различно увлажняться после сушки в зависимости от предшествовавшей влажности, можно использовать для ускоренного определения границы раскатывания;

2) предложенный ускоренный способ определения влажности, соответствующей границе раскатывания, удобно применять при массовых испытаниях глинистых грунтов при инженерно-геологических изысканиях под строительство и при инженерно-геологической съемке территорий.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Смоляницкий Л.А. Оценка свойств грунтов по величине релаксации напряжений // Геоэкология, инженерная геол., геоэкология, Российская. Акад. Наук, № 1, 1993. — С. 63-75.
2. Смоляницкий Л.А. Прогноз состояния земляного полотна. — Воронеж, ВГУ, НИИ Геологии / Труды, выпуск 40, 2006. — 145 с.
3. Чеботарев Г.П. Механика грунтов, основания и земляные сооружения. Издательство литературы по строительству. — М., 1968. — 615 с.