
ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПРЕДЕЛОВ ПЛАСТИЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2018 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: kafs08@bk.ru

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

Рассматриваются противоречия, возникающие при определении пределов пластичности глинистых грунтов по различным методикам, принятым в мировой практике. Для объяснения возникающих противоречий проводится анализ природы пределов пластичности с позиций физико-химической теории эффективных напряжений. Показано, что расхождения в значениях верхнего предела пластичности глинистых грунтов обусловлены тем, что при его определении по разным методикам фиксируются содержания влаги, характеризующие различные физико-химические состояния грунта. Показатель предела текучести, определяемый по нормативам ГОСТ, отражает содержание влаги в глинистых грунтах, находящихся на стадии перехода от раннего к среднему диагенезу. Этот переход характеризуется сменой преобладающих в микроструктуре глин дальних коагуляционных контактов на ближние коагуляционные, что и обуславливает проявление ими пластических свойств. Показатель *Liquid Limit* соответствует влажности грунта на стадии начального седиментогенеза и характеризует момент начала формирования дальних коагуляционных контактов. Различная физико-химическая природа показателей *предела текучести* и *Liquid Limit* объясняет невозможность их достоверного и объективного сопоставления в практических исследованиях.

Ключевые слова: *показатель пластичности, показатель текучести, микроструктура, структурные контакты, литогенез, седиментогенез, диагенез, катагенез, реальные эффективные напряжения, Plastic Limit, Liquid Limit*

DOI: 10.1134/S086978031804004X

ВВЕДЕНИЕ

Способность проявлять пластические свойства – возможность пластически деформироваться при определенной влажности без разрушения и разрыва под действием нагрузки, сохраняя эту деформацию после ее снятия, – важнейшая особенность глинистых грунтов, отличающая их от грунтов других классов и видов. Это свойство положено в основу их классификации. В соответствии с положениями ГОСТ 25100-2011¹, именно наличие свойства пластичности характеризует связный грунт как глинистый.

Характеристика пластических свойств глинистых грунтов проводится на основе определения верхнего и нижнего пределов пластичности – предельных значений влажности, при преодолении которых глинистый грунт переходит из, соответственно, текучего состояния в пластичное и из пластичного в твердое. Определение этих преде-

лов в мировой практике проводится по методикам, регламентируемым различными национальными и международными стандартами. Эти методики имеют определенное сходство, но, наряду с этим, содержат и ряд принципиальных различий, приводящих к существенной разнице результатов испытаний.

Вопрос взаимного согласования результатов исследований, выполненных по различным отечественным и зарубежным методикам, становится все более и более актуальным в связи с постоянно расширяющимся сотрудничеством российских и зарубежных организаций в области изысканий, строительства и эксплуатации строительных, промышленных, энергетических и др. объектов. Одним из важных аспектов такого согласования является вопрос определения характеристик пластичности глинистых грунтов, который имеет не только научное, но и прикладное значение при проведении инженерных расчетов для строительства.

¹ ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 42 с.

Таблица 1. Корреляционные зависимости значений показателей LL и W_L по данным различных авторов

Автор, год исследования	Корреляционная зависимость
Stefanoff, G., 1957	$W_L = 0.69 \times LL + 5.1$
Skopek, J., Ter-Stepanian, G., 1975	$W_L = 0.71 \times LL + 6.9$
Дмитриев В.В., 1981	$W_L = 0.75 \times LL + 5.14$ $LL = 1.25 \times W_L - 4.6$
Дурдойн А., Освелл Дж. М., Локтев А., 1993	$W_L = 0.71 \times LL + 5$ $LL = 1.4 \times W_L - 7$
Локтев А.С. Черное море	$LL = 0.98 \times W_L + 13$
Локтев А.С. Карское море	$LL = 1.4 \times W_L - 10$
Локтев А.С. Печорское море	$LL = 0.78 \times W_L + 6.6$
Локтев А.С. Охотское море	$LL = 1.22 \times W_L - 2.8$
Собственные данные [8]	
Регион исследований:	
Южно-Месопотамская низменность	$LL = 1.4 \times W_L - 10$
Шельф Баренцева моря	$LL = 1.7863 \times W_L - 12.508$ $LL = 1.106 \times W_L^{1.0909}$
Шельф Каспийского моря	$LL = 0.7117 \times W_L^{1.1649}$

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Определение нижнего предела пластичности (*предел пластичности* W_p в стандартах ГОСТ² и ISO³, *Plastic Limit PL* в стандартах ASTM⁴ и BS⁵) проводится примерно по одинаковым методикам, некоторые различия в них заключаются лишь в размерах анализируемых фракций. Это не оказывает существенного влияния на результаты анализа. Результаты определений нижнего предела пластичности по методикам различных нормативных систем оказываются практически идентичными.

Значительно более сложная и неоднозначная ситуация с определением верхнего предела пластичности. В российской нормативной системе ГОСТ понятие верхнего предела пластичности (*предела текучести* W_L) базируется на научно-ме-

тодических разработках П.А. Ребиндера [10], и для его определения применяется балансирующий конус А.М. Васильева. В основе методик, принятых в зарубежных странах (*Liquid Limit – LL*), лежат принципы “пределов Аттерберга”. Определение величины LL проводится по методу А. Казагранде (Casagrande method в нормативной системе ASTM), методу пенетрации конусом (cone penetrometer method в нормативной системе BS) и методу падения конуса (fall-cone test в нормативной системе ISO) и их вариациям, принятым в нормативных документах различных стран. Результаты определений, проведенные по каждой из этих методик, различаются между собой, и наибольшие различия отмечаются при их сопоставлении с российскими методиками, причем значение LL всегда оказывается выше значения предела текучести (W_L). При этом, несмотря на имеющиеся различия, параметры предела текучести и LL в общем случае принято считать характеристикой одного и того же состояния грунта.

Проблемы сопоставления величин W_L и LL были ранее подробно рассмотрены автором в числе соавторов [8]. Проведенные авторами исследования показали, что соотношение этих величин меняется для различных регионов и разных видов грунтов. Исследователи [2, 3, 15] предлагают для разных регионов различные эмпирические зависимости, полученные в результате сопоставления результатов параллельных опытных определений, выполненных по разным методикам, что может быть проиллюстрировано данными, приведенными в табл. 1. Единой зависимости, позволяющей достоверно взаимно пересчитывать значения W_L и LL , разработано быть не может. Авторами была предложена универсальная формула пересчета, но она применима лишь в классификационных целях, и не может применяться в практических исследованиях для характеристики пластичности глинистых грунтов.

В результате, в зависимости от методики определения верхнего предела пластичности практически при одной и той же влажности грунт может рассматриваться либо как пластичное, либо как текучее тело. Это обстоятельство не может не вносить неопределенность в определение его других свойств, в том и числе механических. При этом однозначный достоверный пересчет результатов испытаний, выполненных по различным стандартам, невозможен.

Причина такого несоответствия заключается в нечеткости понимания механизма проявления глинами пластичности или текучести и, соответственно, сущности пределов пластичности – значений влажности грунта, при переходе через которые происходит изменение его физико-химического состояния. Этот вопрос рассматривался,

² ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.

³ ISO 14688-2:2017 Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil. ISO/TS 182 Geotechnics. 2017-2. 11 p.

⁴ ASTM D 4318-17 Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soil. Book of Standards Volume: 04.08. 20 p.

⁵ BS 1377-2:1990 Methods of Test for civil engineering purposes – Part 2. Classification tests. British Standards Institution (BSI). 01.01.2010. 72 p.

в частности, Р.Э. Дашко [1], отмечавшей, что число пластичности — один из самых субъективных и физически неопределенных показателей. Она отмечает, что «два показателя — W_L и W_P в почвоведении имеют физический смысл: первый из них близок к влажности начала загнивания корневой системы растений, а второй — начала ее увядания».

В целом, можно утверждать, что на современном этапе развития науки существуют существенные противоречия в определении пластичности глинистых грунтов. Эти противоречия остаются неустранимыми с традиционных позиций исследований свойств глинистых грунтов. Для их объяснения необходимо определить причину и закономерности проявления и изменения их физико-химического состояния при колебании содержания влаги.

Такую возможность дает активно развивающаяся в настоящее время в России физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах — новое научное направление, созданное П.А. Ребиндером [11], сформулированное в виде фундаментальной комплексной теории в работах В.И. Осипова и представителей его научной школы [4–7, 9].

В соответствии с положениями данной теории, глины являются дисперсной системой, дисперсная фаза которой представлена минеральными частицами, а дисперсионная среда — водой. Вода в глинах, в отличие от представлений современной традиционной механики грунтов, не только заполняет поровое пространство, но и находится в связи с минеральными частицами, формируя гидратные пленки вокруг них. Структурообразование глин происходит за счет образования контактов между минеральными частицами, формирующихся в результате взаимодействия сил притяжения и отталкивания между частицами и расклинивающего действия их гидратных пленок. Преобладание каждого из типов контактов — дальнего коагуляционного, ближнего коагуляционного или переходного точечного в структуре глины зависит от количества влаги (толщины гидратной пленки) и определяет ее физико-химическое состояние — текучее, пластичное или твердое, соответственно. Внешние эффективные напряжения, действующие в грунте при воздействии нагрузок, передаются на структурные контакты и компенсируются расклинивающим действием гидратных пленок. Суммарное напряжение, при котором происходит разрушение контакта, определяет его прочность. Для определения такой прочности, обусловленной силами взаимодействия структурных элементов грунта на их контактах, В.И. Осиповым [7] было сформулировано понятие реальной эффективной прочности. Каждый тип контактов характеризу-

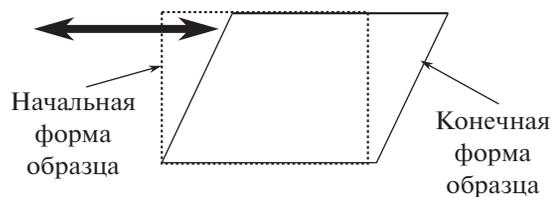


Рис. 1. Принципиальная схема испытаний грунтов на сдвиг методом скашивания.

ется своей предельной реальной эффективной прочностью, а влажность грунта, при которой происходит изменение прочности присущих ему структурных контактов, определяет величину пределов пластичности, при которых происходит переход глины из текучего физико-химического состояния в пластичное и из пластичного в твердое.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение реальной эффективной прочности глин, т.е. прочности структурных контактов слагающих их минеральных частиц, возможно только в таких условиях испытаний, при которых воздействие внешних нагрузок производится непосредственно на сами контакты. При этом не должно происходить дополнительного расхода энергии на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнение, разрушение, нарушение сплошности и т.п.

Таким условиям отвечают испытания грунтов в условиях чистого сдвига (скашивания). Сущность метода чистого сдвига (скашивания) заключается в приложении к образцу грунта сдвигающей нагрузки в условиях невозможности изменения объема грунта. При таких нагрузках не происходит нарушения сплошности грунта и перемещения одной его части относительно другой, а деформация происходит только за счет перемещения частиц дисперсной фазы относительно друг друга при изменении формы образца (рис. 1). Соппротивление грунта сдвигу в этом случае определяется прочностью его структурных связей. Приложенные нагрузки равномерно распределяются по всему объему испытываемого грунта, что позволяет утверждать, что максимальное общее эффективное напряжение в образце во время испытания соответствует сумме предельных напряжений на контактах в этом грунте.

Предельные общие эффективные напряжения при сдвиге (σ') определяются как сумма касательного (τ) и нормального (σ_1) напряжений в момент разрушения структурных связей в образце за вычетом порового давления (σ_w). Поровое давление возникает в грунте при приложении к нему нор-

мального напряжения и остается постоянным в течение всего испытания, что подтверждает неизменность объема образца при испытаниях по схеме прямого сдвига (скашивания). Величина предельного общего эффективного напряжения постоянна для каждого грунта и не зависит от величины нормального напряжения. Проведенные испытания подтверждают, что увеличение нормального напряжения при испытаниях прочности структурных связей глинистых грунтов методом скашивания приводит к закономерному снижению касательного напряжения и росту порового давления так, что суммарная величина эффективных напряжений при разрушении структурных связей грунта остается постоянной.

Экспериментальные исследования по методу скашивания (всего более 1200 испытаний) позволили оценить прочность контактов для разновидностей глинистых грунтов и определить граничные значения влажности, при которых происходит резкое изменение напряжений. В качестве объекта исследований использовались глинистые моренные грунты Московского региона (*gIms*). В минеральном составе они содержат терригенную составляющую, представленную кварцем и полевыми шпатами, и глинистую, представленную преимущественно иллитом и каолинитом, в незначительном количестве в составе глинистой фракции присутствуют смектиты. В зависимости от разновидности грунта наблюдается закономерное изменение содержания глинистой и терригенной составляющей. Наибольшее количество терригенной составляющей характерно для супесей, для тяжелой глины оно минимально. Испытания проводились на искусственных монолитах, изготовленных из грунтовой пасты тяжелых и легких глин и суглинков и супесей различной влажности и заданной плотности с условием полного водонасыщения грунта.

Результаты проведенных исследований (рис. 2) демонстрируют, что величина предельного общего эффективного напряжения глинистых грунтов закономерно снижается в ряду тяжелые глины – легкие глины – тяжелые суглинки – легкие суглинки – супеси. Это обусловлено составом исследованных грунтов, а именно количеством глинистых частиц в них, а, следовательно, и количеством структурных контактов. Наряду с этим, величина предельного общего эффективного напряжения каждой разновидности грунта снижается по мере увеличения в нем влаги, причем, на фоне общего равномерного снижения, выделяются два участка, где они носят резкий скачкообразный характер. Эти участки соответствуют влажности грунта, равной их *пределу пластичности* W_p и *Plastic Limit* и *пределу текучести* W_L , определенному по методике ГОСТ, принятой в практике грунтоведческих исследований в России. Необходимо отметить, что шаг, с которым

изменялась влажность испытываемых грунтов, подбирался таким образом, чтобы в интервалах, близких значениям пределов пластичности, определенных для каждого из испытываемых грунтов по различным методикам, не превышал 0.5–1%.

Полученные результаты экспериментальных исследований демонстрируют физико-химическую природу проявления глинистыми грунтами свойств пластичности и подтверждают положения классификации глинистых пород по типу структурных связей В.И. Осипова [4, 5]. Изменение преобладающих типов структурных контактов в глинах происходит на разных стадиях литогенеза. На стадии седиментогенеза и раннего диagenеза в глинах преобладают наименее прочные и устойчивые дальние коагуляционные контакты, что обуславливает их текучее состояние. На стадии среднего диagenеза в глинах формируются и преобладают в структуре более прочные ближние коагуляционные контакты, а глины приобретают пластичные свойства. На стадии позднего диagenеза и в начале катагенеза в строении глин преобладают точечные переходные контакты, имеющие наибольшую прочность, что соответствует твердому физико-химическому состоянию глин.

На границе влажности, соответствующей величине LL (которая, как уже было отмечено выше, всегда превышает величину W_L), определяемой по методикам ASTM, ISO, BS и др., резких изменений значений реальной эффективной прочности в глинистых грунтах не происходит. Это очевидно указывает на то, что величина LL имеет отличную от W_L физико-химическую природу.

Определение *Liquid Limit* основано на принципах классификации, разработанных А. Аттербергом (Albert Mauritz Atterberg) [12, 14], уточненных впоследствии А. Казаранде (Arthur Casagrande) [13] и легших в основу разработанной им классификации грунтов для строительства аэропортов, принятых в зарубежной грунтоведческой практике под названием “пределов Аттерберга”. В соответствии с этими принципами, *Liquid Limit* определяется как максимальное содержание воды в грунте, при котором он еще обладает минимальным сопротивлением сдвигу. С генетических позиций это физико-химическое состояние грунта соответствует переходу от взвеси, суспензии к структурированному осадку, т.е. оно характеризует стадию начала седиментогенеза глин. Таким образом, показатель LL имеет принципиальное отличие от показателя W_L , т.е., несмотря на свою близость по названию, эти величины характеризуют различное физико-химическое состояние грунта. Это объясняет невозможность однозначного сопоставления этих показателей.

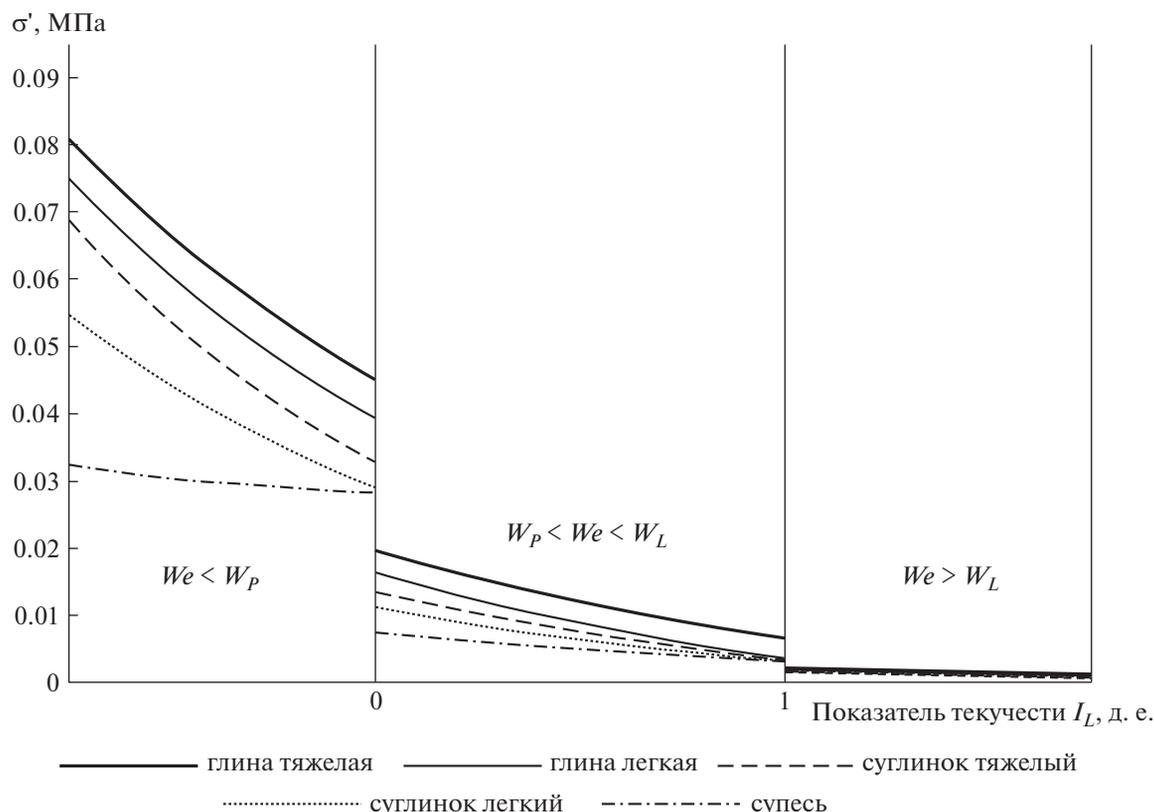


Рис. 2. Зависимость величины предельного общего эффективного напряжения (σ') разновидностей глинистых грунтов от содержания влаги.

В то же время, граница начала седиментогенеза, т.е. граничная влажность, при которой глина проявляет сопротивление сдвигу, весьма условна. На этот момент обращали внимание многие исследователи. Так, Д. Тейлор (Donald Wood Taylor) [16], отмечает: "... содержание воды, при котором впервые отмечается появление сопротивления сдвигу, не имеет определенного значения". Это означает, что показатель LL (величина влажности, при которой начинается седиментогенез глин) не имеет однозначного толкования. Поэтому в практических исследованиях в разных странах для определения *Liquid Limit* применяются различные способы, вариации методов КазAGRANDE (Casagrande method), падения конуса (fall-cone test) и пенетрации конусом (cone penetrometer method), показывающие различные, хотя и близкие между собой результаты.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования и проведенный анализ их результатов позволяют сделать следующие выводы.

Глины и глинистые грунты являются дисперсными системами, дисперсная фаза которых представлена минеральными частицами, а дисперси-

онная среда — водой. Способность проявлять свойства пластичности, важнейшее особое свойство, присущее только глинам, обусловлено их микроструктурным строением, формирующимся в результате физико-химических процессов взаимодействия дисперсной фазы и дисперсионной среды в ходе литогенеза, в результате которого формируются структурные контакты между минеральными частицами.

Свойство пластичности характерно для глин, находящихся в таком физико-химическом состоянии, при котором в их микроструктуре преобладают ближние коагуляционные контакты, формирующиеся в ходе литогенеза глин на стадии среднего диагенеза. Такое физико-химическое состояние глин определяется предельными значениями содержания в них влаги, ниже которых глины приобретают свойства твердого, а выше — текучего тела.

Указанные предельные значения влажности соответствуют, с одной стороны, величинам *предела пластичности* W_p и *Plastic Limit*, практически идентично определяемым по различным мировым нормативным методикам, и, с другой — величине *предела текучести* W_L , определяемой по методике ГОСТ, принятой в практике грунтоведче-

ских исследований в России. Именно при влажности глин, соответствующей этим пределам, происходит резкое изменение реальной эффективной прочности грунтов, определяемой прочностью их структурных контактов.

Физико-химическая природа показателя *Liquid Limit*, определяемого в мировой практике различными методами, заключается в том, что он определяет влажность, которой обладают глины в начале стадии седиментогенеза. Этот показатель не имеет однозначного значения, в результате чего его определение проводится различными методами в разных мировых нормативных системах, дающими отличные, хотя и близкие между собой результаты.

Различия физико-химической природы показателей *предела текучести* W_L и *Liquid Limit* объясняют и подтверждают невозможность их достоверного и объективного сопоставления, показанную в предшествующих исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашко Р.Э. Научно-практическое обоснование изменения положений действующих ГОСТов по номенклатуре песчано-глинистых грунтов и методов изучения их состава, состояния и физико-механических свойств // В сб. Сергеевские чтения. Вып. 12. Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий. М.: РУДН, 2010. С. 315–320.
2. Дмитриев В.В. О корреляции некоторых классификационных наименований нескальных грунтов, принятых в СССР и США // Инженерная геология. 1981. № 4. С. 80–96.
3. Локтев А.С. Разработка основ методики инженерно-геологических изысканий на шельфе Арктических морей // Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 29 с.
4. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
5. Осипов В.И. Литогенез и формирование свойств грунтов // Тр. 27-й сессии Междунар. геологического конгресса. Т. 17. Инженерная геология. 1984. С. 45–51.
6. Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. 2011. № 4. С. 291–305.
7. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Геоэкология. 2013. № 1. С. 3–24.
8. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Кальберген Р.Г., Кутерин В.Н. Гармонизация отечественного и зарубежных стандартов по классификации дисперсных грунтов // Геоэкология. 2012. № 2. С. 104–127.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
10. Ребиндер П.А., Семенов Н.А. О методике погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // Доклады АН СССР. 1949. Т. 64. С. 835–838.
11. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
12. Blackall T.E. A.M. Atterberg 1846-1916 // Geotechnique. 1952. № 3(1). P. 17–19.
13. Casagrande A. Research on the Atterberg Limits of Soils. Public Roads. 1932. № 12(3). P. 121-30 and 136.
14. Kinnison C.S. Technological Papers of the Bureau of Standards. 1915. № 46. A Study of the Atterberg Plasticity Method, U.S. Department of Commerce, Bureau of Standards, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. P. 10.
15. Skopek J. Beriehung zwischen der Fliessgrenze der Böden nach Wassiljew und nach Casagrande // Proc. 4th Budapest Conf. soil Mech. and Found. Eng. (3rd Danube – Eur. Conf.), Budapest, 1971. P. 307.
16. Taylor D.W. Fundamentals of soil mechanics. Seventh printing. New-York–London, 1954. 712 p.

PHYSICO-CHEMICAL NATURE OF THE CLAYEY SOILS PLASTICITY LIMITS

F. S. Karpenko^{a, #}

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]E-mail: kafs08@bk.ru

Different methods of practical determination the plasticity limits of the clay soils in the various world normative systems and the emerging contradictions are considered. Determination of the lower limit of plasticity – W_p (plastic limit – PL) is carried out by similar methods in all normative systems. Accordingly, the results of the definitions are practically the same. Different methods of determining the upper limit of plasticity lead to significant differences in the test results. The explanation of these divergences is given from the standpoint of physicochemical theory of effective stresses, considering the microstructure of clays that formed due to the formation of contacts between mineral particles as the result of the interaction of forces of attraction and repulsion between the particles and the wedging actions of their hydrated films. It is shown that the liquid limit determined by different methods correspond to different physicochemical state of the clay soil. The liquid

limit value determined according to the GOST standards (upper limit of plasticity – W_L) characterizes the moisture content in the clay soils during lithogenesis at the stage of transition from early to middle diagenesis. This transition is characterized by the replacement of far coagulation contacts (prevailing in clay microstructure) for near coagulation contacts, resulting in the appearance their plastic properties. The liquid limit index determined according to the ASTM, BS and ISO standards (LL) corresponds to the soil moisture at the stage of initial sedimentogenesis and characterizes the moment of the far coagulation contacts formation beginning. The different physicochemical nature of the upper limit of plasticity – W_L and liquid limit – LL parameters explains the impossibility of their reliable and objective comparison in practical studies.

Key words: *plasticity index, liquidity index, microstructure, structural contacts, lithogenesis, sedimentogenesis, diagenesis, catagenesis, real effective stress, plastic limit, liquid limit*

REFERENCES

1. Dashko, R.E. *Nauchno-prakticheskoe obosnovanie izmeneniya polozhenii deistvuyushchikh GOSTov po nomenklature peshano-glinistykh gruntov i metodov izucheniya ikh sostava, sostoyaniya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv* [Scientific and practical rationale for changing the conditions of the current GOSTs for the nomenclature of sandy-clay soils and methods and studying their composition, state and physical-mechanical properties]. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 12. Nauchnoe obosnovanie aktualizatsii normativnykh dokumentov inzhenerno-geologicheskikh i inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniy* [Proc. Sci. Conf. in commemoration of academician E.M. Sergeev. Vol. 12.] Moscow, 2010, pp. 315–320. (in Russian).
2. Dmitriev, V.V. *O korrelyatsii nekotorykh klassifikatsionnykh naimenovaniy neskal'nykh gruntov, prinyatykh v SSSR i SShA* [About the correlation of some classification names of non-clay soils adopted in the USSR and the USA]. *Inzhenernaya geologiya*, 1981, no. 4, pp. 80–96. (in Russian).
3. Loktev, A.S. *Razrabotka osnov metodiki inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy na shel'fe Arkticheskikh morei. Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk.* [Development of the basis of the methodology of engineering and geological surveys on the shelf of the Arctic seas. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-min.) Diss.]. Moscow, 2004, 29 p. (in Russian).
4. Osipov, V.I. *Priroda prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv glinistykh porod* [Strength and deformation properties of clay soils nature]. Moscow Univ. Publ., 1979. 232 p. (in Russian).
5. Osipov, V.I. *Litogenez i formirovaniye svoystv gruntov* [Lithogenesis and formation of soil properties]. *Trudy 27 sessii Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa. T. 17. Inzhenernaya geologiya* [Proc. 27-th session of the International Geological Congress. Vol. 17. Engineering geology]. 1984, pp. 45–51. (in Russian).
6. Osipov, V.I. *Nanoplenki adsorbirovannoi vody v glinakh, mekhanizm ikh obrazovaniya i svoystva* [Nanofilms of adsorbed water in clays, the mechanism of their formation and properties]. *Geoekologiya*, 2011, no. 4, pp. 291–305. (in Russian).
7. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazheniy v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils] *Geoekologiya*, 2013, no. 1, pp. 3–24. (in Russian).
8. Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Kal'bergenov, R.G., Kutergin, V.N. *Garmonizatsiya otechestvennogo i zarubezhnykh standartov po klassifikatsii dispersnykh gruntov* [Harmonization of national and foreign standards for the classification of dispersed soils]. *Geoekologiya*, 2012, no. 2, pp. 104–127. (in Russian).
9. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroenie i formirovaniye svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of the properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 576 p. (in Russian).
10. Rebinder, P.A., Semenenko, N.A. *O metodike pogruzheniya konusa dlya kharakteristiki strukturno-mekhanicheskikh svoystv plastichno-vyazkikh tel* [About the method of a cone immersion for the characteristic of the structural and mechanical properties of viscoelastic bodies]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR]. 1949, vol. 64, pp. 835–838. (in Russian).
11. Rebinder, P.A. *Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Selected works. Surface phenomena in disperse systems]. Moscow, Nauka, 1979, 384 p.
12. Blackall, T.E. A.M. Atterberg 1846–1916. *Geotechnique*, 1952, no. 3(1), pp. 17–19.
13. Casagrande, A. Research on the Atterberg Limits of Soils. *Public Roads*, 1932, no. 12(3), pp. 121–30 and 136.
14. Kinnison, C.S. *Technological Papers of the Bureau of Standards*. 1915, no. 46. A Study of the Atterberg Plasticity Method, U.S. Department of Commerce, Bureau of Standards, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., pp. 10.
15. Skopek, J. Beriehung zwischen der Flie遝grenze der B6den nach Wassiljew und nach Casagrande. *Proc. 4th Budapest Conf. soil Mech. and Found. Eng.* (3rd Danube – Eur. Conf.), Budapest, 1971, p. 307.
16. Taylor, D.W. *Fundamentals of soil mechanics*. Seventh printing. New-York – London, 1954. 712 p.