

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/17-62

Ссылка для цитирования этой статьи:

Трацевская Е.Ю. Экспериментальное исследование характеристик пластичности неводонасыщенных грунтов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2018. №1

539.3; 551.332.53

Экспериментальное исследование характеристик пластичности неводонасыщенных грунтов

Е.Ю. Трацевская
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
eltrats@mail.ru

Experimental study the characteristics of plasticity of soils Newtonian

H.YU. Tratsevskaya
Gomel State University named after F. Skorina

Аннотация. Установлены общие закономерности влияния генезиса, состава и свойств твердой фазы супесчаного грунта на его пластичность в напряженном состоянии. Показано, что повышенная пластичность аллювиальных грунтов связана с формированием свойств на стадии позднего диагенеза и незавершенностью процесса консолидации, а также их большей гидрофильностью. Отмечено, что пластичность и деформируемость моренных супесей заметно снижены, из-за повышения степени литификации грунтов. Увеличение пластичности и деформируемости флювиогляциальных отложений объясняется изменениями, происходящими при процессах выветривания. На основании экспериментальных данных построены графики изменения модулей деформации супесчаных грунтов в зависимости от давления.

Ключевые слова: пластичность, влажность, супеси, деформируемость

General regularities of the influence of the Genesis, composition and properties of the solid phase of a sandy loam soil on its plasticity under tension are installed. Increased plasticity of the alluvial soil above the floodplain associated with the formation of properties at the stage of late diagenesis and incomplete process of consolidation, as well as their greater hydrophilicity. Plasticity and deformability moraine loams due to the increase in the degree of their lithification is greatly reduced. Increased ductility and deformability fluvioglacial deposits by weathering processes is explained. Graphs of modulus of deformation of sandy loam soil depending on the pressure obtained on the basis of experimental data

Keywords: plasticity, moisture content, sandy loam, deformability

Введение. Под пластичностью грунта понимается его способность деформироваться без разрыва сплошности под воздействием внешних механических усилий и сохранять полученную форму после их снятия [1]. Это свойство характеризует возможность проявления в грунте остаточных деформаций. Применение теории пластичности в расчетах грунтовых оснований позволяет выявить его прочностные и деформационные ресурсы [2].

К изучению пластичности в современном грунтоведении сложился двойной подход. С одной стороны, она характеризуется способностью грунта к необратимым (пластическим) деформациям под действием определенного внешнего механического усилия, а с другой – способностью грунта переходить в пластическую консистенцию в определенных интервалах его влажности при неопределенной величине внешнего усилия. Первый параметр является прямой характеристикой пластичности грунта, второй – косвенной [1].

При постепенном увеличении давления на фундамент, расположенного на естественном основании, его осадка примерно будет характеризоваться графиком, изображенным на рис.1. На графике видно, что по мере возрастания давления до определенного предела (точка I на рис. 1) осадка фундамента развивается практически пропорционально действующему давлению, т.е. наблюдается их линейная зависимость. Именно такая зависимость позволяет применять при расчётах напряжений в горных породах под фундаментами и их осадок теорию линейно деформируемой среды [3]. Эту фазу деформации горных пород называют фазой уплотнения (отрезок *a* на рис. 1). Под фундаментом в некоторой его области происходит преимущественно уплотнение грунтов, уменьшение их пористости, формируется уплотненное ядро.

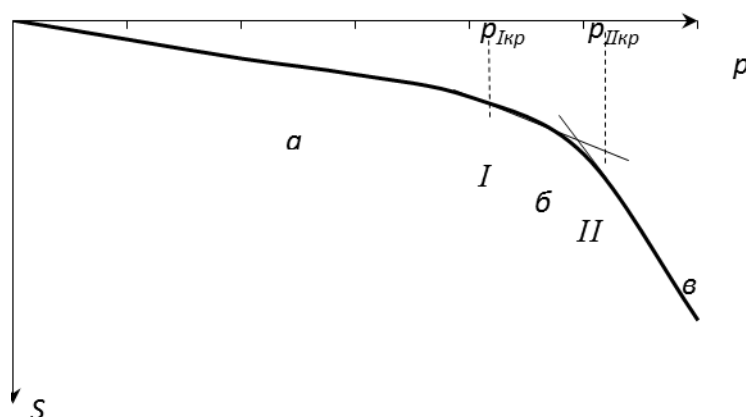


Рис. 1 – График развития осадки фундамента

При дальнейшем увеличении давления осадка фундамента становится неравномерной, нарастает быстрее, чем увеличивается давление. Нарушается пропорциональность осадки возрастающей нагрузке (отрезок *б*, рис. 1). Это указывает на начало разрушения грунтов, образование локальных сдвигов у краев фундамента. На этой стадии существенно преобладают необратимые деформации, которые проявляются в результате невозможности восстановления отдельных структурных связей, необратимого смещения частиц (кристаллов, зерен, обломков и др.), постепенного накопления микродефектов, которые сами по себе не восстанавливаются [1]. Формируются остаточные пластические деформации, которые постепенно охватывают все большую и

большую область под фундаментом вокруг уплотненного ядра. Эту фазу деформаций грунтов называют фазой сдвигов (рисунок 1, отрезок б).

К концу второй фазы (точка II на рис. 1) сдвиги в отдельных точках сливаются в сплошную поверхность скольжения, и подготавливается наступление третьей фазы – выпора грунтов из-под фундамента, т.е. полное их разрушение. Это фаза выпирания (рис. 1, отрезок в). Критическую нагрузку, соответствующую точке II на рис. 1 принимают за несущую способность грунтов R_0 .

В данной статье исследуется деформирование грунтов в пластичном состоянии. Устоявшееся в грунтоведении понятие пластичности из-за простоты определения и тесной корреляционной связи с показателями других свойств грунтов рассматривается главным образом с точки зрения их консистенции. Пластичность определяется характерными влажностями – нижним W_p и верхним W_L пределами пластичности; числом пластичности I_p и показателем текучести I_L . При определении характерных влажностей используются грунты нарушенного сложения. В естественном залегании они, благодаря действию структурных связей, по своему состоянию, т.е. консистенции и деформируемости могут существенно отличаться от тех же пород нарушенного сложения [1, 4]. Таким образом, применяемые пределы пластичности являются условными косвенными показателями пластичности грунтов. Они характеризуют свойства пороодообразующих минералов при некоторых значениях влажности.

При анализе численных значений этих показателей, приведенных в научной литературе, отчетах различных изыскательских организаций, а также полученных при исследованиях проведенных автором [6–10] установлено, что при изменении числа пластичности в пределах одного номенклатурного типа, например, для супеси значения характерных влажностей грунтов различных геолого-генетических комплексов существенно отличаются (таблица 1).

Таблица 1 – Влажностные показатели супеси

Геолого– генетический комплекс	Влажности, %					S_r	I_p	I_L^*	K	K_p
	W	W_p	W_L	W_{sat}	$W_{отн.}$					
Аллювиальный (aIV)	20,0	17,9	24,1	0,25	0,83	0,80	5,8	0,34	2,62	0,63
Аллювиальный первая надпойменная терраса (a_1IIIpz)	23,1	19,0	26,7	0,25	0,87	0,92	6,1	0,64	3,11	0,71
Аллювиальный вторая надпойменная терраса (a_2IIIpz)	17,4	19,1	25,0	0,21	0,70	0,83	5,9	0,28	2,91	0,69
Озерно– аллювиальный	16,8	17,2	22,6	0,20	0,74	0,85	5,1	0,39	–	–

(<i>laIIIpz</i>)										
Флювиогляциальный (<i>fIId^s</i>)	16,3	14,0	18,0	0,21	0,91	0,76	4,5	0,22	2,73–5,00	0,54–1,25
Моренный (<i>gIId</i>)	10,6	12,6	17,0	0,14	0,62	0,80	5,5	0,24	2,58–4,25	0,83–1,38

Примечание: I_p^* – только в пределах пластичности

Характеристика объекта исследования. Объектом исследований служили супесчаные неводонасыщенные грунты различного генезиса. Супеси относятся к дисперсным глинистым грунтам, т.е. к тонкодисперсным образованиям, содержащим не менее 3 % глинистых частиц с числом пластичности $1 \leq I_p \leq 7$. Наиболее характерной их чертой является резкое изменение деформируемости и прочности при увлажнении.

Структура супесей образована за счет непосредственного контакта песчаных частиц, при этом адсорбированное на поверхности крупных зерен глинистое вещество не образует сплошной сетки. Т.е. в них кулоновское трение между частицами меньше, чем в чистых песках, а коагуляционная сетка слабая и прерывистая [1, 11]. Тем не менее, глинистые частицы чрезвычайно активны, даже 3 % глинистой фракции достаточно, чтобы связный грунт приобрел глинистые свойства: связность, пластичность и др.

Были изучены супеси различного генезиса, образовавшиеся в четвертичном периоде, которые широко распространены в юго-восточной части Беларуси: днепровские ледниковые *gIId* и флювиогляциальные *fIId*; поозерские (валдайские) озерно-аллювиальные *laIIIpz* и аллювиальные – второй *a₂IIIpz* и первой *a₁IIIpz* надпойменных террас, а также голоценовые отложения поймы реки Сож *aIV*.

Влияние состава и свойств твердой фазы связного грунта на его пластичность. Как известно, пластичность грунтов зависит от минерального и гранулометрического составов, присутствия в грунте органических веществ, состава обменных катионов, состава и концентрации внешних растворов [1]. В статье пластичность связных грунтов рассматривается с точки зрения ее обусловленности составом и свойствами твердой фазы.

Минеральный состав. По одним данным в аллювиальных пылевато-глинистых грунтах, распространенных в юго-восточной части Беларуси, преобладают каолинит-гидрослюдистая и монтмориллонит-гидрослюдистая ассоциации, а в моренах – диоктоэдрические гидрослюды (иллит, гидрослюда), каолинит, хлорит, смектит. Причем, отмечается, что каолинит и монтмориллонит преобладают только в древнем аллювии, а начиная с неоплейстоцена в глинистом аллювии преобладает гидрослюда [12]. По другим, в аллювии соответственно – каолинит-иллит, смектит-иллит-каолинит, а в морене – иллит, каолинит, смектит, смешаннослойные (иллит-смектит) [13].

Гранулометрический состав. Увеличенной пластичностью характеризуются грунты, обладающие большей дисперсностью. При определении гранулометрического состава супесей за основу принята классификация Сабанина по скорости падения частиц в воде [4]. Это связано с

тем, что коллоидная активность K_p и показатель гидрофильности K пылевато-глинистых грунтов определяются с использованием процентного содержания в грунте частиц, диаметр которых меньше 0,005 мм (M_c). Данные о содержании глинистых частиц M_c приведены в таблице 2.

Гидрофильность глинистых минералов определяется удельной поверхностью и зависит от их состава и структуры [1]. Гидрофильность глинистой фракции и ее коллоидную активность можно установить при параллельном определении пластичности грунтов и содержания глинистой фракции. Основные показатели физического состояния и свойств грунтов приведены в таблицах 1 и 2.

Показатель гидрофильности определяется из выражения [4]:

$$K = W_L / M_c.$$

Как показано в таблице 1, максимальными и минимальными значениями показателя гидрофильности, а также его максимальным диапазоном изменения обладают грунты первой и второй надпойменной террас a_1pzIII и a_2pzIII . Поэтому им свойственны максимальные значения влажностей верхнего предела пластичности W_L , а также диапазона их изменения (таблица 1). Это объясняется, возможным присутствием в минеральном составе грунтов аллювиального генезиса минералов монтмориллонитово–гидрослюдистой ассоциации.

Таблица 2 – Показатели некоторых физических свойств грунтов

Геолого-генетический комплекс	Содержание частиц диаметром <0,005 мм M_c	Коэффициенты пористости			Коэффициенты	
		e			K_d	K_c
Аллювиальный (aIV)	9,2	$\frac{0,66}{0,58-0,76}$	0,64	0,48	$\frac{(-0,13)}{0,38 - (-0,75)}$	$\frac{(-0,01)}{0,04 - (-0,07)}$
Аллювиальный – первая надпойменная терраса (a_1IIIpz)	8,6	$\frac{0,67}{0,53 - 0,85}$	0,72	0,51	$\frac{0,24}{0,91 - (-0,62)}$	$\frac{0,03}{0,11 - (-0,080)}$
Аллювиальный – вторая надпойменная терраса (a_2IIIpz)		$\frac{0,56}{0,45 - 0,70}$	0,67	0,51	$\frac{0,69}{0,72 - (-0,19)}$	$\frac{0,07}{0,13 - (-0,018)}$
Озерно –аллювиальный ($laIIIpz$)		$\frac{0,54}{0,41 - 0,66}$	0,61	0,46	$\frac{0,44}{1,33 - (-0,33)}$	$\frac{0,03}{0,12 - 0,00}$
Флювиогляциальный ($flId^s$)	3,6–8,4	$\frac{0,57}{0,39 - 0,80}$	0,48	0,38	$\frac{(-0,90)}{0,9 - (-3,2)}$	$\frac{(-0,06)}{0,06 - (-0,22)}$
Моренный ($glId$)	4,0–6,6	$\frac{0,37}{0,30 - 0,85}$	0,46	0,35	$\frac{0,82}{1,46 - (-3,55)}$	$\frac{0,06}{0,11 - (-0,27)}$

Примечание: В числителе приведены средние значения показателей, в знаменателе – диапазон значений

Коллоидная активность определяет процессы коагуляционного структурообразования в глинистых грунтах. Показатель коллоидной активности K_p определяется по формуле [1]:

$$K_p = I_p / M_c.$$

Рассматриваемые грунты по этому показателю можно отнести к грунтам со средней и в большей степени – низкой активностью. Причем, большей коллоидной активностью обладают флювиогляциальные *fIId* и ледниковые *gIId* отложения, что связано с пониженным содержанием в их гранулометрическом составе глинистой фракции (таблица 2).

Для грунтов активных в физико-химическом отношении характерны повышенные значения верхнего предела пластичности W_L [4].

Влияние жидкой компоненты на консистенцию грунтов. На состояние пылевато-глинистых грунтов существенно и по-разному влияют различные категории воды, содержание которых обуславливается в основном минеральным составом грунтов и связанной с ним дисперсностью. Пластичность грунтов обуславливает наличие осмотической связанной воды, т.к. при ее наличии частицы передвигаются относительно друг друга без разрыва сплошности. Формирование осмотической воды происходит в основном в интервале между нижним W_p и верхним W_L пределами пластичности. Дальнейшее увлажнение грунта до полной влагоемкости W_{sat} приводит к появлению свободной воды. Значения указанных влажностей W_L и W_{sat} близки (таблица 1).

Относительная влажность грунтов $W_{отн}$ определяется из выражения [4]:
$$W_{отн} = W / W_L.$$

По этому показателю судят об относительной дегидратированности грунтов. Чем $W_{отн}$ меньше, тем более дегидратирован грунт и тем более устойчива его консистенция. Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что в большей степени дегидратированы моренные *gIId* и супеси второй надпойменной террасы *a₂IIIpz*.

Уплотненность супесчаных грунтов определяется по коэффициенту естественной уплотненности:

$$K_d = e_L - e_0 / e_L - e_p,$$

где e_0 – коэффициент пористости в условиях естественного залегания,

e_p и e_L – приведенные коэффициенты пористости, соответствующие переходу грунта из пластичного в твердое и из текучего в пластичное состояние.

Кроме того, используется показатель степени сжатия грунта [3]:

$$K_c = e_L - e_0 / 1 + e_L.$$

Рассчитанные значения e_p , e_L , K_d и K_c приведены в таблице 2. Большие вариации значений коэффициентов естественной уплотненности K_d и показателей степени сжатия K_c свидетельствуют о том, что рассматриваемые грунты находятся на разных стадиях литогенеза. Отрицательные значения показателей характерны для недоуплотненных грунтов аллювиального и озерно-аллювиального генезиса, которые формируются при прогрессивном литогенезе на стадии позднего диагенеза. Уплотнение таких пород

продолжается, т.к. состояние равновесия и консолидация их еще не достигнуты. На ранней стадии катагенеза происходит дальнейшее уплотнение пород, отжатие из них слабосвязанной (осмотической) воды; влажность уменьшится, но не достигает нижнего предела пластичности ($W \geq W_p$). Естественная пористость породы соответствует пористости интервала «предел текучести – предел пластичности», т.е. $0 < K_d$ и $K_c < 1$. Такими значениями обладает большинство изучаемых грунтов, это грунты средней уплотненности.

Моренные отложения характеризуются низкой пористостью ($e = 0,33-0,43$). Это связано с уплотняющим действием ледника от его веса и движения, высыханием осадка и давлением выше отложившихся пород. [4, 11]. Уплотнению также способствует большая разнородность гранулометрического состава грунтов. При выветривании (регрессивный литогенез) возрастает пористость пород, повышается их пластичность и влажность, ухудшаются физико-механические свойства [11].

Деформируемость грунтов. В литературе активно обсуждается влияние различных факторов на деформируемость глинистых пород. Здесь рассмотрим роль дисперсности (главным образом, содержания частиц глинистой фракции) и той стадии литогенеза, на которой сформированы свойства супесчаных грунтов.

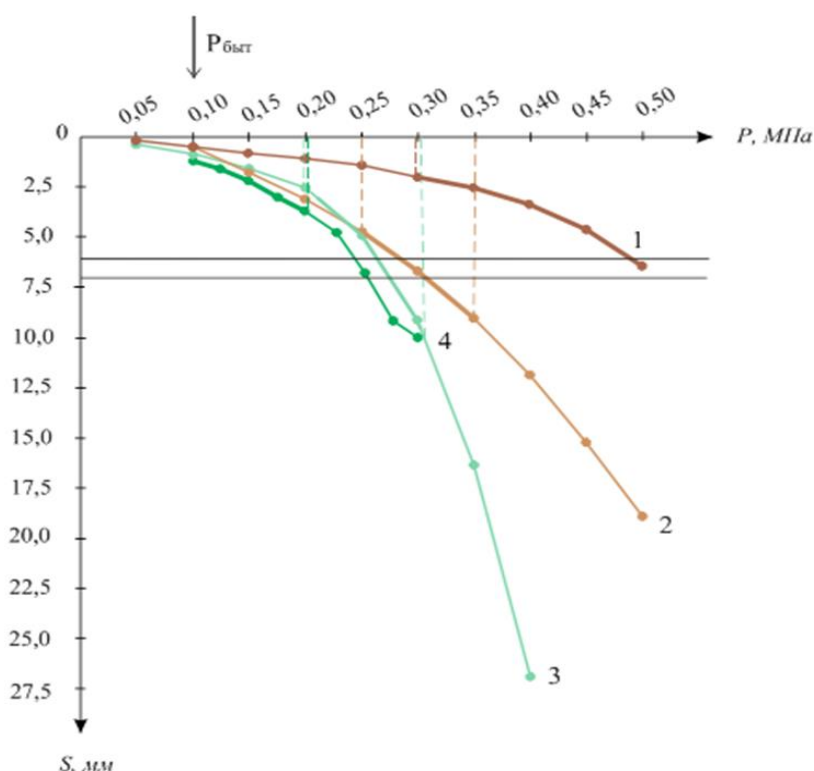


Рис. 2 – Графики зависимости осадки штампа от давления

На рис. 2 представлены графики результатов штамповых испытаний различных грунтов: 1 – моренные *gllд* твердой-полутвердой консистенции; 2 – моренные *gllд* скрытопластичной консистенции; 3 – аллювиальные второй

надпойменной террасы a_2IIIpz скрытопластичной консистенции; 4 – аллювиальные первой надпойменной террасы a_1IIIpz скрытопластичной консистенции. Утолщение линий соответствует интервалу пластических деформаций. Полевые эксперименты были выполнены разными изыскательскими организациями. Для анализа выбраны результаты, полученные при испытании штампами с плоской подошвой площадью 600 см^2 при одинаковой глубине заложения (бытовая нагрузка $P_{\text{быт}} = 0,1 \text{ МПа}$).

На рисунке видно, что у отложений моренных $gIId$ и второй надпойменной террасы a_2IIIpz при приложении давления P больше бытового $P_{\text{быт}}$ проявляется линейная зависимость между давлением и деформацией. В определенных интервалах давления эти грунты ведут себя как квазитвердые тела, что соответствует их твердой и полутвердой консистенции.

При давлениях 0,22; 0,25 и 0,30 МПа соответственно супеси второй надпойменной террасы a_2IIIpz , и моренные $gIId$ скрытопластичной и твердой консистенции переходят в пластичное состояние. Этим значениям давления соответствуют осадки 2,7; 4,7 и 3,0 мм. В соответствии с СТБ 1648-2006 [14], связанные с этими давлениями напряжения, возникающие в грунтах, определяют их структурную прочность.

Супеси первой надпойменной террасы a_1IIIpz практически сразу же при приложении нагрузки равной бытовой переходят в пластичное состояние и структурной прочностью не обладают.

По остаточным деформациям можно судить о пластичности грунтов. Рассмотрим, например, интервал осадок грунтов $\Delta S = 6,0 \div 7,0$ мм. Тангенсы углов наклона прямых $tg \alpha = \Delta S / \Delta P$ для моренных супесей $gIId$ твердой и скрытопластичной консистенции соответственно равны 2,86 и 3,70; второй a_2IIIpz и первой a_1IIIpz надпойменных террас – 7,14 и 9,10. Чем больше $tg \alpha$, тем порода более податлива, сильнее уплотняется в пределах заданного интервала давления.

По деформационным кривым, как это было описано выше, можно определить предел несущей способности грунта R_0 , а также интервалы давлений $\Delta P_{\text{пл}}$ и соответствующих осадок $\Delta S_{\text{пл}}$, в которых грунт проявляет свойство пластичности, причем, без изменения весовой влажности. В результате, $R_0 = 0,35; 0,30$ и $0,20$ МПа для моренной супеси скрытопластичной консистенции $gIId$, аллювиальной второй надпойменной террасы a_2IIIpz и аллювиальной первой надпойменной террасы a_1IIIpz . Соответственно $\Delta P_{\text{пл}} = 0,01; 0,08$ МПа и $\Delta P_{\text{пл}} > 0,2$ МПа и $\Delta S_{\text{пл}} = 4,3; 7,3$ мм и $\Delta S_{\text{пл}} > 4,5$ мм.

На рисунке 3 приведены графики зависимости модуля деформации от давления, нумерация кривых такая же, как на рис. 2. Модули деформации рассчитывались для каждой кривой по известной формуле [5]:

$$E = (1 - \nu^2) K_p K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta S},$$

где ν – коэффициент Пуассона, принимается равным 0,30;

K_p – коэффициент зависимости от заглубления штампа h/D (h – глубина расположения штампа, D – диаметр штампа, см);

K_1 – коэффициент, равный 0,79 для жесткого круглого штампа;

Δp – приращение давления на штамп $\Delta p = p_n - p_{n-1}$, p_n – давление на границе n -го участка соответствующей экспериментальной кривой (см. рис. 2), МПа;

ΔS – приращение осадки штампа, соответствующее Δp , см.

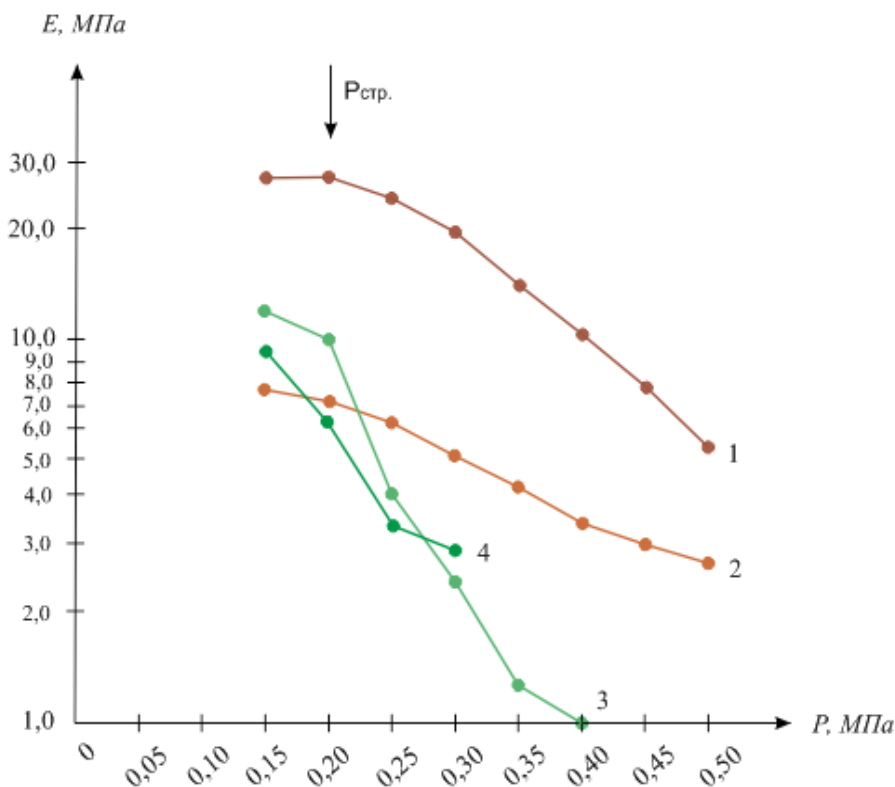


Рис. 3 – – Графики зависимости модуля деформации от давления

По кривым 1 и 2 можно судить, что при давлении $P < 0,20$ МПа грунты деформируются с постоянным модулем, т.е. упруго. Следовательно, указанное давление численно соответствует структурной прочности грунта $P_{стр.}$ [1]. На начальном участке кривой 1 значение модуля деформации супесей твердой-полутвердой консистенции в 3,7 раз больше, чем у супеси скрытопластичной консистенции (кривая 2). Затем с ростом давления скорость уменьшения модуля деформации гораздо больше для первого материала, что при давлении = 0,50 МПа приводит к их отличию только в 2 раза. Это эффект объясняется относительно большим уплотнением первого грунта за счет уменьшения объема пор при давлениях превышающих структурную прочность.

Подобная закономерность наблюдается у аллювиальных отложений (кривые 3, 4). Грунты второй надпойменной террасы в естественном залегании менее влажные (таблица 1). При увеличении давления пористость уменьшается, что приводит к перераспределению видов воды при постоянной весовой

влажности, в частности, содержание осмотической воды увеличивается. Поэтому у них с ростом давления модуль деформации падает быстрее, чем у супесей первой надпойменной террасы, при этом на участке $0,25 < P < 0,30$ МПа модули выравниваются. Следует здесь отметить отсутствие упругих участков деформирования, что обусловлено незавершенностью процесса диагенеза.

По всем определенным критериям можно сделать вывод о том, пластичность супесей возрастает в следующей последовательности: моренные твердой–полутвердой консистенции *gIId* → моренные скрытопластичной консистенции *gIId* → аллювиальные второй надпойменной террасы *a₂IIIpz* → аллювиальные первой надпойменной террасы *a₁IIIpz*.

При сравнении графиков, представленных на рис. 2 и 3 очевидны различия в численных значениях критических давлений $P_{Iкр.}$ и $P_{IIкр.}$. На наш взгляд, эти показатели корректнее и легче определять по графикам, представленным на рисунке 3, т.е. по зависимости $E = E(P)$.

Представленные результаты могут быть полезными при расчетах фундаментов зданий и сооружений, передающих как статические, так и вибродинамические воздействия на естественные основания, при расчетах элементов конструкций, связанных с деформируемыми основаниями, например [15–22].

Выводы. Общие закономерности влияния генезиса, состава и свойств твердой фазы супесчаного грунта на его пластичность в напряженном состоянии сводятся к следующим положениям:

- повышенная пластичность аллювиальных грунтов первой и второй надпойменной террас *a₁pzIII* и *a₂pzIII* связана с формированием свойств на стадии позднего диагенеза и незавершенностью процесса консолидации, а также их большей гидрофильностью;
- пластичность и деформируемость моренных супесей *gIId* заметно снижены, что обуславливается повышением степени литификации грунтов.
- увеличение пластичности и деформируемости флювиогляциальных отложениях *fIId* объясняется изменениями, происходящими при процессах выветривания.
- для более корректного определения критических нагрузок $P_{Iкр.}$ и $P_{IIкр.}$, а также структурной прочности грунтов $P_{стр.}$ предлагается использовать графики зависимости $E = E(P)$.

Литература

1. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королев В.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. М.: Изд-во Московского университета, 2005. 1023 с.

2. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 416 с.
3. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. – Л.: Недра, 1984. 496 с.
4. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1984. 511 с.
5. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / под ред. Е.М. Сергеева // Том 1. Полевые методы. М., Недра, 1984. 422 с.
6. Трацевская Е.Ю. Особенности формирования техногенного подтопления дисперсных грунтов // Природные ресурсы. 2008. № 2. С. 106–112.
7. Трацевская Е.Ю. Экспериментальное исследование динамических характеристик неустойчивости трехфазных грунтов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2017. № 2; URL: mathmod.esrae.ru/12-38
8. Трацевская Е.Ю. Геологическая опасность развития подтопления грунтов и оценка экономических рисков при ее реализации // Природные ресурсы. 2009. № 1. С. 102–109.
9. Трацевская Е.Ю. Влияние развития техногенного подтопления в дисперсных грунтах на надежность системы «основание-фундамент-здание» // Экология урбанизированных территорий. № 2. 2011. С. 71–76.
10. Трацевская Е.Ю. Динамическая неустойчивость квазитиксотропных моренных грунтов // Литосфера. 2017. № 1 (46). С. 107–111.
11. Осипов В.И. Природа прочности и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ, 1979. 231 с.
12. Инженерная геология России / под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. Том 1. Грунты России. М.: Книжный дом, 2011. 671 с.
13. Галкин А.Н. Инженерная геология Беларуси. Часть 1. Грунты Беларуси Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2016. 367 с.
14. СТБ 1648-2006. Строительство и архитектура. Основания и фундаменты. Термины и определения. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. 47 с.
15. Могилевич Л.И., Попов В.С., Старовойтов Э.И. Гидроупругость виброопоры с трехслойной круглой упругой пластиной с несжимаемым наполнителем // Наука и техника транспорта. 2006. № 2. С. 56–63.
16. Starovoitov, E.I. Leonenko D.V. Resonant effects of local on circular sandwich plates on an elastic foundation // International applied mechanics. 2010. Vol. 46, N 1. P. 86–93.
17. Starovoitov E.I., Leonenko D.V. Impact of thermal and ionizing radiation on a circular sandwich plate on an elastic foundation // International Applied Mechanics. 2011. Vol. 47, No. 5. Pp. 580-589. doi: 10.1007/s10778-011-0481-y.

18. Starovoitov E.I., Leonenko, D.V., Yarovaya, A.V. Elastoplastic bending of a sandwich bar on an elastic foundation // International Applied Mechanics. 2007. Vol. 43, N 4. P. 451–459.
19. Starovoitov E.I., Kubenko V.D., Tarlakovskii D.V. Vibrations of circular sandwich plates connected with an elastic foundation / Russian Aeronautics. 2009. Vol. 52. N 2. P. 151–157.
20. Kubenko V.D., Pleskachevskii Yu.M., Starovoitov E.I., Leonenko D.V. Natural vibrations of a sandwich beam on an elastic foundation. International Applied Mechanics. 2006. Vol. 42. N 5. P. 541-547.
21. Starovoitov E.I., Leonenko D.V. Impact of thermal and ionizing radiation on a circular sandwich plate on an elastic foundation International // International Applied Mechanics. 2011. Vol. 47, N 5. P. 580-589.
22. Старовойтов Э.И. Упругопластическое деформирование трехслойных стержней в температурном поле // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 3. С. 91-98.