

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН

Грацевская Е. Ю.

*Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель*

**Введение.** Одним из основных видов техногенных воздействий на геологическую среду [1–3] и элементы конструкций [4–10] являются вибродинамические нагрузки, возникающие при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Такие нагрузки могут приводить к изменению физико-механических свойств грунтов оснований и тем самым влиять на состояние инженерных объектов. Исследование подобных явлений проводилось экспериментально и теоретически в работах [11–14].

При изучении пластичности в современной механике грунтов сложился двоякий подход. С одной стороны, она характеризует способность грунта и элементов конструкций к необратимым (пластическим) деформациям под действием определенного внешнего механического воздействия, а с другой – способность грунта переходить в пластическое состояние в определенных интервалах влажности при неопределенной величине внешнего усилия. Первый параметр является прямой характеристикой пластичности грунта и конструкционных материалов, второй – косвенной.

Под пластичностью грунта понимается его способность деформироваться без разрыва сплошности при воздействии внешних механических усилий и сохранять полученную форму после их снятия [1; 15]. Это свойство характеризует возможность проявления в грунтах и материалах остаточных деформаций. Применение теории пластичности в расчетах грунтовых оснований позволяет выявить его прочностные и деформационные ресурсы.

Устоявшееся 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, а следовательно, и деформируемости могут существенно отличаться от тех же пород нарушенного сложения. Таким образом, применяемые пределы пластичности являются условными косвенными показателями пластичности грунтов. Они характеризуют свойства породообразующих минералов при некоторых значениях влажности.

Деформированию слоистых элементов конструкций при пластическом деформировании, посвящены многочисленные исследования, в том числе статьи [16–21]. В них рассмотрено деформирование трехслойных стержней, пластин и цилиндрических оболочек связанных и не связанных с упругим основанием. Кинематика трехслойного пакета принималась соответствующей гипотезе ломаной линии. Влияние упругого основания на деформирование трехслойных элементов конструкций описывалась моделями Винклера и Пастернака. Проведен численный анализ перемещений в зависимости от жесткости грунтового основания.

В статьях [22–26] исследованы вопросы влияния подтопления на свойства дисперсных грунтов. Особенности строения геологической среды Беларуси и Гомеля в связи с необходимостью оценки ее устойчивости и обоснования инженерной защиты городов рассмотрены в публикациях [27–30].

**Деформирование грунтов в упругом и пластичном состояниях.** В данной статье исследуется деформирование грунтов в упругом и пластичном состояниях и их влияние на связанные с ними трехслойные элементы конструкций. 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.

Были изучены супеси различного генезиса, которые широко распространены в юго-восточной части Беларуси: днепровские ледниковые *gПd* и флювиогляциальные *fПd*; поозерские озерно-аллювиальные *laПpz* и аллювиальные – второй *a<sub>2</sub>Пpz* и первой *a<sub>1</sub>Пpz* надпойменных террас, а также голоценовые отложения поймы реки Сож *aIV*.

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

Таблица 1 – Влажностные показатели супеси

Геолого–генетический комплекс	Влажности, %					$S_r$	$I_p$	$W_L^*$	$K$	$K_p$
	$W$	$W_p$	$W_L$	$W_{sat}$	$W_{rel}$					
Аллювиальный ( <i>aIV</i> )	20,0	17,9	24,1	0,25	0,83	0,80	5,8	0,34	2,62	0,63
Аллювиальный первая надпойменная терраса ( <i>a<sub>1</sub>Пpz</i> )	23,1	19,0	26,7	0,25	0,87	0,92	6,1	0,64	3,11	0,71
Аллювиальный вторая надпойменная терраса ( <i>a<sub>2</sub>Пpz</i> )	17,4	19,1	25,0	0,21	0,70	0,83	5,9	0,28	2,56	0,69
Озерно–аллювиальный ( <i>laПpz</i> )	16,8	17,2	22,6	0,20	0,74	0,85	5,1	0,39	–	–
Флювиогляциальный ( <i>fПd<sup>в</sup></i> )	16,3	14,0	18,0	0,21	0,91	0,76	4,5	0,22	2,16	0,90
Моренный ( <i>gПdn</i> )	10,6	12,6	17,0	0,14	0,62	0,80	5,5	0,24	2,59	1,11
Примечание: $I_L^*$ – только в пределах пластичности										

Пластичность грунтов зависит от минерального и гранулометрического составов, присутствия органических веществ, состава обменных катионов, концентрации внешних растворов [1]. Здесь 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. По другим, в аллювии соответственно – каолинит-иллит, смектит-иллит-каолинит, а в морене – иллит, каолинит, смектит, смешаннослойные (иллит-смектит).

**Гранулометрический состав.** Большой пластичностью характеризуются грунты, обладающие большей дисперсностью. При определении гранулометрического состава супесей за основу принята классификация Сабанина по скорости падения частиц в воде. 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.

Таблица 2 – Показатели некоторых физических свойств грунтов

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

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

**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  $K = W_L / M_c$ . Как показано в таблице 1, максимальными значениями влажности верхнего предела пластичности  $W_L$  обладают грунты первой надпойменной террасы ( $a_1Шрз$ ). Поэтому им свойственны максимальные значения показателя гидрофильности. Это объясняется, возможным присутствием в минеральном составе грунтов аллювиального генезиса минералов монтмориллонитово–гидрослюдистой ассоциации.

**Коллоидная активность** определяет процессы коагуляционного структурообразования в глинистых грунтах. Показатель коллоидной активности  $K_p$  определяется по известной формуле  $K_p = I_p / M_c$  [1].

Рассматриваемые грунты по этому показателю можно отнести к грунтам со средней и в большей степени – низкой активностью. Причем, большей коллоидной активностью обладают флювиогляциальные ( $fПд^s$ ) и ледниковые ( $gПдн$ ) отложения, что связано с пониженным содержанием в их гранулометрическом составе глинистой фракции (см. таблицы 1 и 2).

**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  $W_{rel}$  определяется из выражения  $W_{rel} = W / W_L$ . По этому показателю судят об относительной дегидратированности грунтов. Чем  $W_{rel}$  меньше, тем более дегидратирован грунт и тем более устойчива его консистенция. Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что в большей степени дегидратированы моренные ( $gПдн$ ) супеси второй надпойменной террасы ( $a_2Шрз$ ).

**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,  $e_p$ ,  $e_L$  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.

На рисунке 1 представлены графики результатов штамповых испытаний различных грунтов: 1 – моренные ( $g\Pi dn$ ) твердой-полутвердой консистенции; 2 – моренные ( $g\Pi dn$ ) скрытопластичной консистенции; 3 – аллювиальные второй надпойменной террасы ( $a_2\Pi pz$ ) скрытопластичной консистенции; 4 – аллювиальные первой надпойменной террасы ( $a_1\Pi pz$ ) 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  $600\text{ см}^2$  при одинаковой глубине заложения. На рисунке видно, что у отложений моренных ( $g\Pi dn$ ) и второй надпойменной террасы ( $a_2\Pi pz$ ) при приложении давления  $P$  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 ( $a_2\Pi pz$ ), и моренные ( $g\Pi dn$ ) скрытопластичной и твердой консистенции переходят в пластичное состояние. Этим значениям давления соответствуют осадки 2,7; 4,7 и 3,0 мм. Связанные с этими давлениями напряжения, возникающие в грунтах, определяют их структурную прочность.

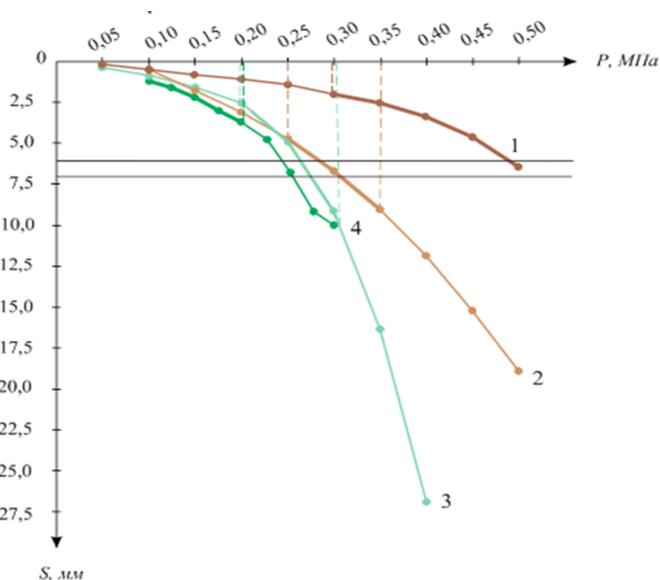


Рис. 1. Графики зависимости осадки штампа от давления

Супеси первой надпойменной террасы ( $a_1\Pi pz$ ) практически сразу же переходят в пластичное состояние и структурной прочностью не обладают.

По остаточным деформациям можно судить о пластичности грунтов. Рассмотрим, например, интервал осадок грунтов  $\Delta S = 6,0-7,0$  мм. Тангенсы углов наклона прямых  $tg\alpha = \Delta S/\Delta P$  для моренных супесей ( $g\Pi dn$ ) твердой и скрытопластичной консистенции соответственно равны 2,86 и 3,70; второй ( $a_2\Pi pz$ ) и первой ( $a_1\Pi pz$ ) надпойменных тер-

рас  $-7,14$  и  $9,10$ . Чем больше  $\operatorname{tg}\alpha$  тем порода более податлива, сильнее уплотняется в пределах заданного интервала давления.

В соответствии с закономерностями развития деформаций грунтов основания учитывают значения критических нагрузок, разделяющих их фазы. Первая критическая нагрузка  $P_I$  – начало разрушения грунта характеризуется переход от линейной зависимости осадки от давления к нелинейной. И вторая –  $P_{II}$  – полное разрушение грунтов основания (предел несущей способности). Критические нагрузки определяют графически по зависимости осадка–давление фундамента (штампа).

Таким образом, по деформационным кривым можно определить предел несущей способности грунта  $R_0$ , а также интервалы давлений  $\Delta P_{pl}$  и соответствующих осадок  $\Delta S_{pl}$ , 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 ( $g\Pi dn$ ), аллювиальной второй надпойменной террасы ( $a_2\Pi pz$ ) и аллювиальной первой надпойменной террасы ( $a_1\Pi pz$ ). Соответственно  $\Delta P_{pl} = 0,01; 0,08$  МПа и  $\Delta P_{pl} > 0,2$  МПа и  $\Delta S_{pl} = 4,3; 7,3$  мм и  $\Delta S_{pl} = 4,3; 7,3$  мм и  $\Delta S_{pl} > 4,5$  мм.

На рисунке 2 приведены графики зависимости модуля деформации от давления, нумерация кривых такая же, как на рисунке 1. Модули деформации рассчитывались для каждой кривой по известной формуле:

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

где  $\nu = 0,30$  – коэффициент Пуассона;

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

$K_1 = 0,79$  – коэффициент для жесткого круглого штампа;

$\Delta P$  – приращение давления на штамп  $\Delta P = P_n - P_{n-1}$ ,  $P_n$  – давление на границе  $n$ -го участка соответствующей экспериментальной кривой (см. рисунок 1), МПа;

$\Delta S$  – приращение осадки штампа, соответствующее  $\Delta P$ , см.

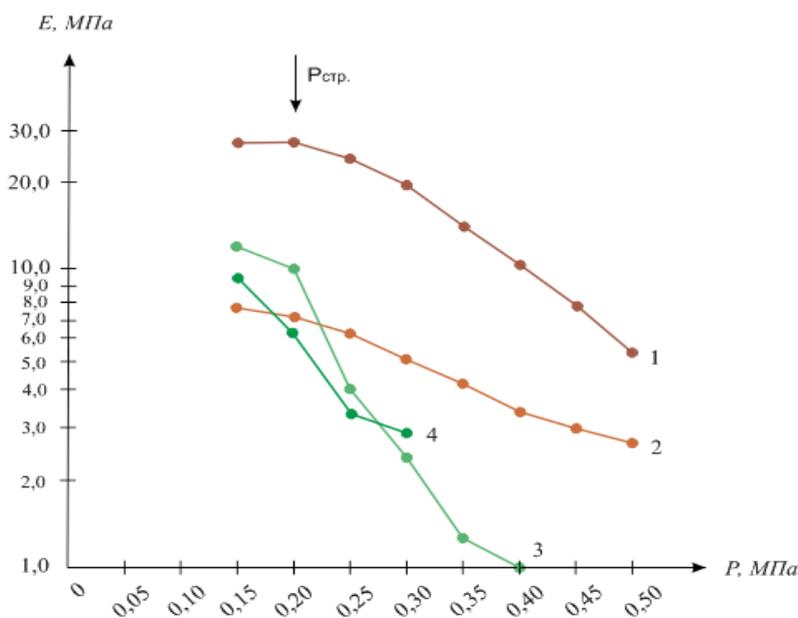


Рис. 2. Графики зависимости модуля деформации от давления

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 (structural strength) грунта  $P_{str}$  [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 грунта, 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 ( $g\Pi dn$ )  $\rightarrow$  моренные скрытопластичной консистенции ( $g\Pi dn$ )  $\rightarrow$  аллювиальные второй надпойменной террасы ( $a_2\Pi pz$ )  $\rightarrow$  аллювиальные первой надпойменной террасы ( $a_1\Pi pz$ ).

При сравнении графиков на рисунках 1 и 2 очевидны различия в численных значениях критических давлений  $P_I$  и  $P_{II}$ . На наш взгляд, эти показатели корректнее и легче определять по рисунку 2, т. е. по зависимости  $E = f(P)$ .

**Деформирование трехслойной круговой пластины на грунтовом основании.** Рассмотрим перемещения в трехслойной круговой пластине, связанной с упругим основанием Винклера. Подобная задача при локальных нагрузках рассматривалась ранее [18]. Поэтому здесь приведем лишь численные результаты, соответствующие равномерно распределенной нагрузке, что является частным случаем решения, приведенного в [18].

Трехслойная пластина единичного радиуса закреплена по контуру. Ее слои набраны из материалов Д16Т-фторопласт-Д16Т, механические характеристики которых заимствованы в [4]. Величина интенсивности поверхностной нагрузки принималась  $q_0 = -1$  МПа. Толщины слоев, отнесенные к ее радиусу  $h_1 = h_2 = 0,04$ ,  $h_3 = 0,4$ . Коэффициенты жесткости соответствуют слабым ( $\kappa = 1$  МПа/м, песок пылеватый), средним ( $\kappa = 100$  МПа/м, туф, крупноблочный грунт) и весьма жестким ( $\kappa = 5000$  МПа/м, гранит, гнейс) основаниям.

На рисунках 3 а, б показано изменение вдоль радиуса прогиба  $w$  и сдвига в заполнителе  $\psi$  рассматриваемой пластины при различных коэффициентах жесткости основания (МПа/м): 1 –  $\kappa = 1$ , 2 –  $\kappa = 100$ , 3 –  $\kappa = 5000$  (значения перемещений увеличены в 20 раз). Для жестких оснований прогиб перестает быть максимальным в центре пластины, сдвиг в заполнителе меняет знак вдоль радиуса. Увеличение коэффициента жесткости основания приводит к изменению форм кривых.

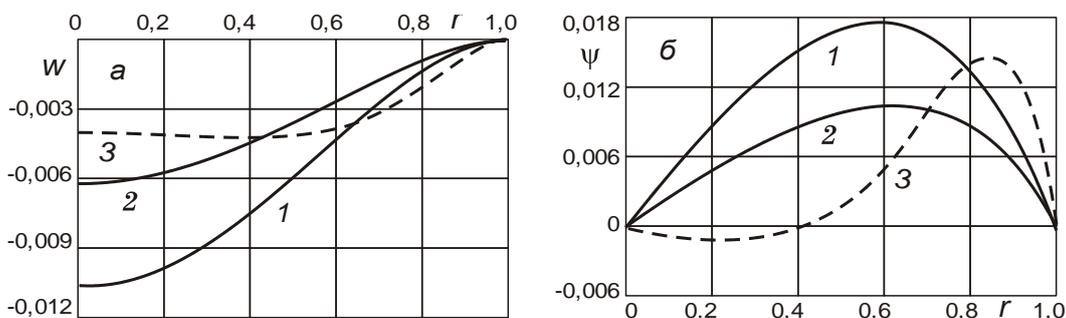


Рис. 3. Перемещения в трехслойной пластине

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтоведение / под ред. В. Т. Трофимова – М. : Изд-во Моск. университета, 2005. – 1023 с.
2. Галкин А. Н. Инженерная геология Беларуси / Часть 1. Грунты Беларуси / А. Н. Галкин – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2016. – 367 с.
3. Инженерная геология России / под ред. В. Т. Трофимова, Е. А. Вознесенского, В. А. Королева // Том 1. Грунты России. – М. : Книжный дом, 2011. – 671 с.
4. Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
5. Могилевич Л. И. Гидроупругость вибропоры с трехслойной круглой упругой пластиной с несжимаемым наполнителем / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, Э. И. Старовойтов // Наука и техника транспорта. – 2006. – № 2. – С. 56–63.
6. Gorshkov, A. G., Starovoitov E. I., Yarovaya A. V. Harmonic Vibrations of a Viscoelastoplastic Sandwich Cylindrical Shell // International applied mechanics. – 2001. – Vol. 37, N. 9. – P. 1196–1203.
7. Starovoitov, É. I. Vibrations of round three-layer plates under the action of distributed local loads / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaya // Strength of materials. – 2002. – Vol. 34, N. 5. – P. 474–481.
8. Vakhneev, S. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation / S. Vakhneev, E. Starovoitov // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18, N. 4. – P. 699–704.
9. Старовойтов Э. И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – 21, № 2. – С. 162–169.
10. Старовойтов, Э. И. Термоупругие свободные колебания трехслойной круговой пластины / Э. И. Старовойтов, М. А. Журавков, А. В. Яровая // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 36. – С. 15–20.

11. Starovoitov, E. I. Of dynamic characteristics three-phase soils and three-layer beams / E. I. Starovoitov, E. Yu. Tratshevskaya, E. L. Kuznetsova // Journal of the Balkan Tribological Association. 2021 – Vol. 27, N. 5. – P. 929–946.

12. Трацевская Е. Ю. Динамическая неустойчивость квазитиксотропных моренных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 107–111.

13. Старовойтов Э. И. Деформирование трехслойных физически нелинейных стержней/ Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский. – М. : Изд-во МАИ, 2016. – 184 с.

14. Deformation of a Step Composite Beam in a Temperature Field / É. I. Starovoitov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, N 4. – P. 1023–1029.

15. Трацевская Е. Ю. Влияние развития техногенного подтопления в дисперсных грунтах на надежность системы «основание–фундамент–здание» / Е. Ю. Трацевская // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – № 2. – С. 71–76.

16. Трацевская Е. Ю. Особенности формирования техногенного подтопления дисперсных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 106–112.

17. Трацевская Е. Ю. Геологическая опасность развития подтопления грунтов и оценка экономических рисков при ее реализации / Е. Ю. Трацевская // Природные ресурсы. – 2009. – № 1. – С. 102–109.

18. Трацевская Е. Ю. Закономерности развития суффозионно-просадочных явлений на территории Белоруссии / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин // Инженерная геология массивов лессовых пород. Труды международной научной конференции; под ред. В. Т. Трофимова, В. А. Королева. – М. – 2004. – С. 108–109.

19. Трацевская Е. Ю. Особенности тектоники территории г. Гомеля в связи с оценкой устойчивости геологической среды // Е. Ю. Трацевская, И. А. Красовская // Литосфера. – 2003. – № 1 (18). – С. 78–85.

20. Трацевская Е. Ю. Особенности освоения техногенных грунтов г. Гомеля в современных условиях / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин // Многообразие грунтов: морфология, причины, следствия. Труды Международной научной конференции; под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королева. – М. – 2003. – С. 123.

21. Трацевская Е. Ю. К вопросу о геологическом обосновании инженерной защиты городов (на примере г. Гомеля) // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 3. – С. 46–47.

22. Роль современных геологических процессов в формировании инженерно-геологических условий территории Гомеля / А. Н. Галкин [и др.] // Литосфера. – 2003. – № 2 (19). – С. 67–73.

23. Инженерно-геологическое районирование территории Гомеля / А. Н. Галкин [и др.] // Литосфера. – 2004. – № 2 (21). – С. 108–116.

*Поступила: 31.03.2023*