

Общество с ограниченной ответственностью

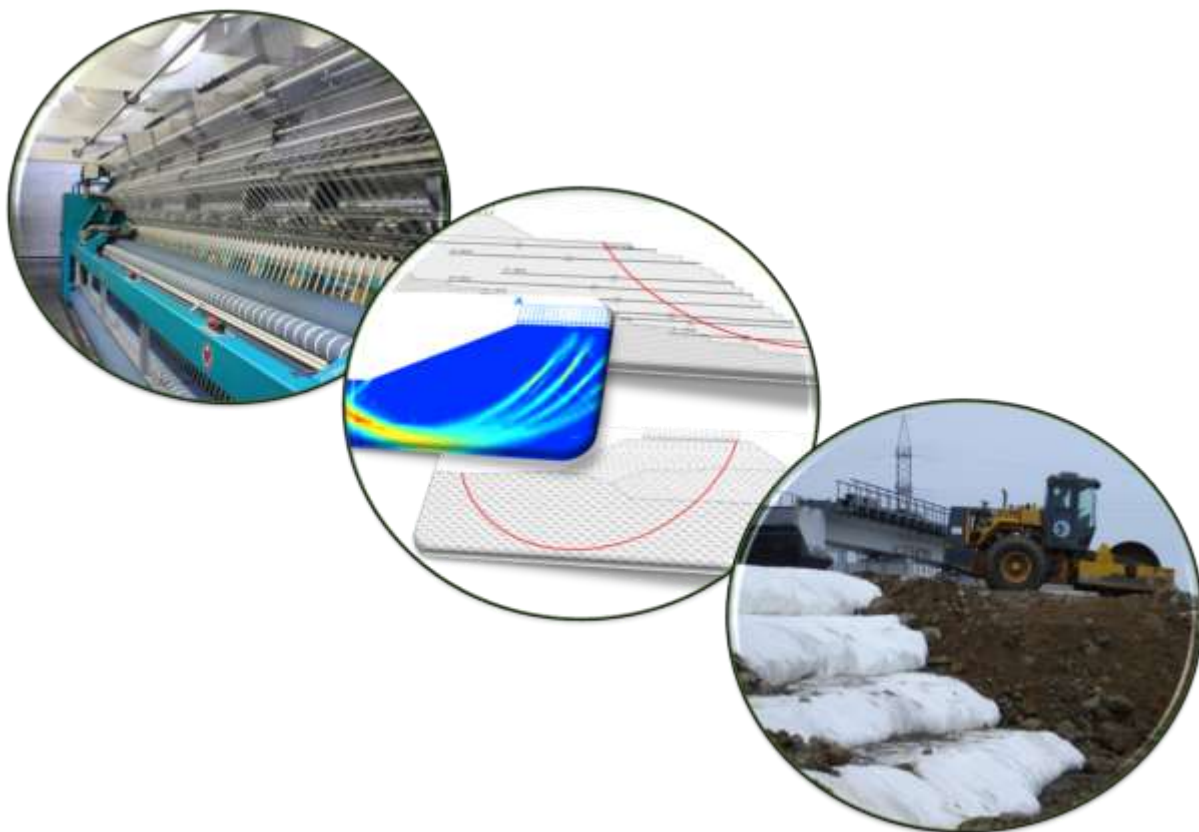
«МИАКОМ СПб»

Россия, Санкт-Петербург, пр. Медиков, д.5

телефон: +7 (812) 309-81-18

[www.miakoming.ru](http://www.miakoming.ru); [office@miakom.ru](mailto:office@miakom.ru)

**СПРАВОЧНИК ПО ТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ  
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.  
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**



Санкт-Петербург

2014

УДК 625

**Рецензент:**

**Золотарь Александр Израилевич,**  
главный специалист ООО «Петербург-Дорсервис» (г. Санкт-Петербург)

Ответственный исполнитель – инженер-геотехник, к.т.н. Вавринюк Т.С.

Научный руководитель – гл. инженер, к.г.- м.н. Федоренко Е. В.

Справочник по техническим характеристикам геосинтетических материалов. Общие положения по расчету земляного полотна. – СПб.: МИАКОМ 2014. – 47 с., ил.

В брошюре собрана информация о силовых геосинтетических материалах, применяемых в качестве конструкций усиления земляного полотна. Приводится описание длительной прочности геоматериалов и определяющих ее понижающих коэффициентов. Характеристики, необходимые для расчета, представлены как в виде таблиц, так и в виде графиков для удобства работы с ними. В разделе «Пример расчета» приводится описание того, как следует выполнять расчет насыпей на слабом основании с усилением геосинтетическими материалами. Кратко описываются варианты расчета в зависимости от предоставленных исходных данных: быстрое и медленное возведение и процесс выбора геоматериала по результатам расчетов.

Данные материалы (информация) являются коммерческим продуктом и не подлежат копированию в любой форме без письменного разрешения ГК «МИАКОМ».

© Коллектив авторов, 2014

© Группа компаний «МИАКОМ», 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Геосинтетические материалы .....	6
2. Технические характеристики и расчетные параметры.....	9
3. Учет геосинтетических материалов в программах численного моделирования..	28
4. Примеры расчетов устойчивости насыпи на слабом основании .....	32
4.1 Общие положения .....	32
4.2 Исходные данные .....	35
4.3 Результаты расчетов.....	35
4.3.1 Быстрое возведение с недренированной прочностью.....	36
4.3.2 Быстрое возведение с прочностными характеристиками, полученными на срезовом приборе .....	37
4.3.3 Устойчивость насыпи после консолидации (эффективные параметры прочности).....	38
4.3.4 Расчеты путем численного моделирования с учетом консолидации .....	38
4.4 Выводы по расчетам устойчивости.....	41
5. Определение нормированного значения коэффициента запаса.....	44
Заключение.....	47



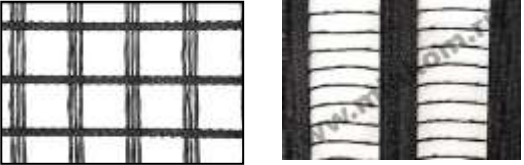

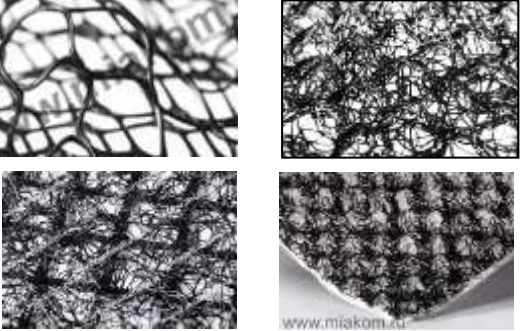
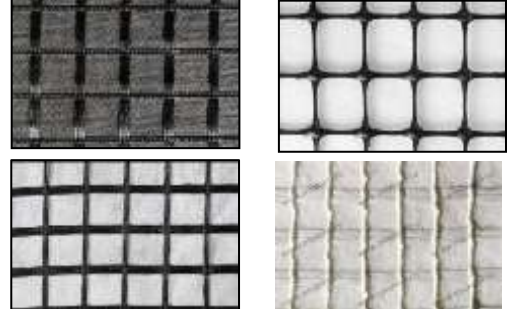


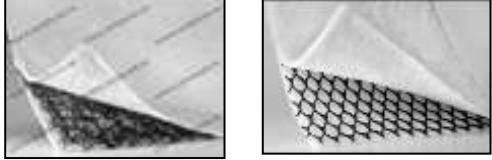
## **ВВЕДЕНИЕ**

За более чем 20 лет истории применения геосинтетических материалов в России, казалось бы, накоплен значительный опыт их использования, однако, в действительности, объем знаний скудный: практически нет учебников, методики расчетов представлены в ограниченном виде, слабо развита база лабораторных испытаний, нормативные и рекомендательные документы при достаточном количестве не позволяют получить ответы на многие вопросы. Во многом это связано с тем, что все это время геосинтетические материалы были представлены иностранными производителями, которые старательно скрывают информацию, предоставляя ее только небольшому количеству выборочных организаций. Не всегда под завесой тайны оказываются действительно ценные вещи. Многие методы расчетов, используемые за рубежом, имеют допущения и упрощения, что свидетельствует о необходимости их дальнейшего развития и совершенствования. К примеру, для расчета жесткой объемной геосинтетической структуры (геоячеистого матраса) в основании насыпи используется теория металлов, имеющая к грунтам лишь отдаленное отношение. И если в мире ежегодно проводятся несколько конференций по геосинтетическим материалам с обменом действительно полезным и новым опытом, то в России этот процесс больше связан с рекламной деятельностью, приносящей мало пользы.

Геосинтетические материалы, или геоматериалы, достаточно разнообразны (таблица 1). Предполагается, что они будут находиться в грунтовых средах и работать в контакте с грунтом, а потому должны учитывать законы механики грунтов. Таким образом, без знания и понимания основ механики грунтов, а также основных принципов и механизмов поведения грунтов, использование геосинтетических материалов в расчетах конструкций автодорожных, железнодорожных, аэродромных, гидротехнических и промышленно-гражданских объектов невозможно.

В этой брошюре мы постарались собрать минимально необходимую для выполнения расчетов информацию о геосинтетических материалах и примеры ее использования в расчетах земляного полотна на слабом основании.

Таблица 1 - Основные виды геосинтетических материалов МИАКОМ

	<p>Геотекстиль:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ иглопробивной <b>МИАКОМ-ИП</b></li> <li>❖ термоскрепленный <b>МИАКОМ-Т</b></li> </ul>
	<p>Георешетки двухосноориентированные <b>ГЕО ДС</b></p>
	<p>Геосетки полиэфирные <b>АРМОСТАБ-АР</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ одноосноориентированные</li> <li>❖ двухосноориентированные</li> </ul>
	<p>Высокопрочный тканый геотекстиль</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ <b>АРМОСТАБ-ПЭТ</b></li> <li>❖ <b>АРМОСТАБ-ПП</b></li> </ul>
	<p>Геоматы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ <b>ГЕО ГМ</b></li> <li>❖ <b>Стабимат-СМТ</b></li> <li>❖ <b>Стабимат-СМТ-К</b></li> <li>❖ <b>Стабимат-БИО</b></li> </ul>
	<p>Геокомпозиаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ <b>Армостаб-Асфальт</b></li> <li>❖ <b>ГЕО ДСК</b></li> <li>❖ <b>АРМОСТАБ-Грунт Д</b></li> <li>❖ <b>АРМОСТАБ-Грунт И</b></li> </ul>
	<p>Газонная решетка <b>ГЕО Газон</b></p>
	<p>Объемные георешетки <b>ГЕО ОР</b></p>
	<p>Дренажные геокомпозиаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ <b>МИАДРЕН-Х</b></li> <li>❖ <b>МИАДРЕН-ДР</b></li> </ul>

## 1. ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Производственные возможности ГК «МИАКОМ» позволяют изготавливать различные варианты геосинтетических материалов, применяемых в разных отраслях строительства для решения разнообразных проблем. Подробную информацию можно найти в информационно-технических брошюрах «Миакком Инжиниринг» и на сайте [www.miakoming.ru](http://www.miakoming.ru). В этой публикации рассматриваются только силовые геоматериалы, предназначенные для выполнения функций армирования.

**Двуосноориентированные геосетки** из полиэстерных (полиэфирных) волокон с полимерным покрытием (рисунок 1) - **АРМОСТАБ-АР2П** – обладают одинаковой прочностью на разрыв в обоих направлениях (от 40 кН/м до 1000 кН/м). Используются как армирующая прослойка, которая является конструктивным элементом дорожной одежды или в конструкции земляного полотна при необходимости равнопрочного усиления. Благодаря проникновению материала засыпки в отверстия ячеек достигается взаимодействие с грунтом и/или другими геотехническими материалами. Применяются также в конструкциях гибкого ростверка на свайном основании.



*Рисунок 1 - Двухосноориентированные геосетки из полиэфирных волокон АРМОСТАБ-АР2П*

**Одноосноориентированные полиэфирные геосетки** (рисунок 2) - **АРМОСТАБ-АР1П** - с повышенной прочностью в одном (продольном) направлении, применяются для укрепления грунтов, требующих армирования в одном направлении, обладают прочностью на разрыв в продольном направлении от 40 кН/м до 1000 кН/м.



*Рисунок 2 - Одноосноориентированные геосетки из полиэфирных волокон АРМОСТАБ-АР1П*

**Геокомпози́ты** – материалы, представляющие собой композиты из нетканого геотекстиля и полиэфирных геосеток, с пропиткой или без нее (рисунок 3). Технические характеристики таких материалов принимают по геосеткам. Отличие этих материалов заключается в наличии геотекстильной прослойки, которая выполняет функции разделения, фильтрации и капилляропрерывателя в дополнение к армирующим функциям геосеток. Геокомпозит **АРМОСТАБ-Грунт И** применяется при устройстве насыпей из обойм с песком, а **Армостаб-Грунт Д** может быть использован при повышенном содержании кислот и щелочей в грунтах.



*Рисунок 3 – Геокомпози́ты: слева полиэфирная геосетка без пропитки (АРМОСТАБ-Грунт И), справа – полиэфирная геосетка с пропиткой (АРМОСТАБ-Грунт Д)*

**Высокопрочный тканый геотекстиль** (рисунок 4) – **АРМОСТАБ-ПЭТ** - представляет собой полотно, изготовленное из полиэфирных нитей по ткацкой технологии, обладает высокой прочностью на растяжение (до 1000 кН/м), вследствие чего может выдерживать большие растягивающие нагрузки при незначительном относительном удлинении.

Материал находит свое применение при устройстве насыпей на свайном основании, в подпорных стенах, в сооружениях на слабых основаниях. Преимущества использования:

- подходит для армирования мелкозернистых грунтов;
- вместе с функцией армирования выполняются также функции разделения;
- высокий предел прочности на разрыв при низком относительном удлинении;
- высокий уровень сопротивления микробиологическому воздействию;
- высокая устойчивость повреждению в процессе укладки.

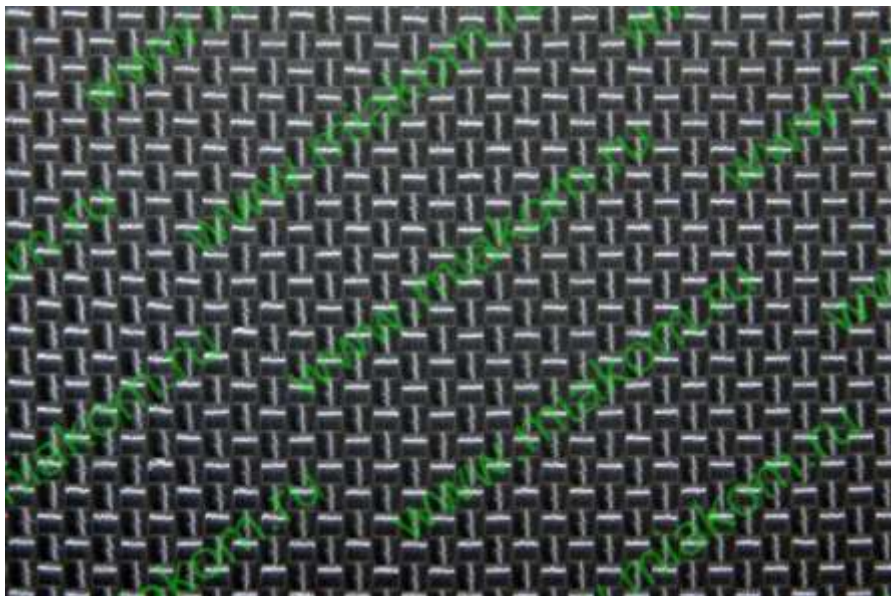


*Рисунок 4 – Высокопрочный тканый геотекстиль АРМОСТАБ-ПЭТ*

**Тканый геотекстиль из полипропилена** (рисунок 5) – **АРМОСТАБ-ПП** - представляет собой тканое геотекстильное полотно, изготовленное из переплетенных между собой полипропиленовых нитей. Полипропиленовая основа защищает ткань от воздействия химических веществ и микробиологических процессов, что обеспечивает длительный срок службы материала. Как правило, этот материал применяется при устройстве временных дорог в виде обойм. Учитывая, что ткани из полиэфирных нитей с прочностью на разрыв менее 100 кН/м имеют неустойчивую («рыхлую»)



структуру, то в диапазоне прочности при разрыве от 40 кН/м до 100 кН/м предпочтительнее использование именно полипропиленовых геотекстилей. Однако не стоит забывать, что полипропилен имеет склонность к ползучести и не рекомендуется отечественными нормативно-рекомендательными документами к использованию в конструкциях, подверженных длительным статическим нагрузкам (основания насыпей, подпорные стены).



*Рисунок 5 - Тканый геотекстиль для армирования грунта АРМОСТАБ-ПП*

## **2. Технические характеристики и расчетные параметры**

Любой геосинтетический материал, предполагаемый к использованию в качестве армирующей прослойки, характеризуется следующими прочностными расчетными показателями (рисунок 6):

1. Прочность при разрыве (паспортная)  $F_{ult}$  и удлинение при разрыве  $\epsilon_{ult}$ ;
2. Усилие, вызывающее удлинение на 2% ( $F_{2\%}$ );
3. Усилие, вызывающее удлинение на 5% ( $F_{5\%}$ ).

Графически эти показатели отображены на рисунке 6.

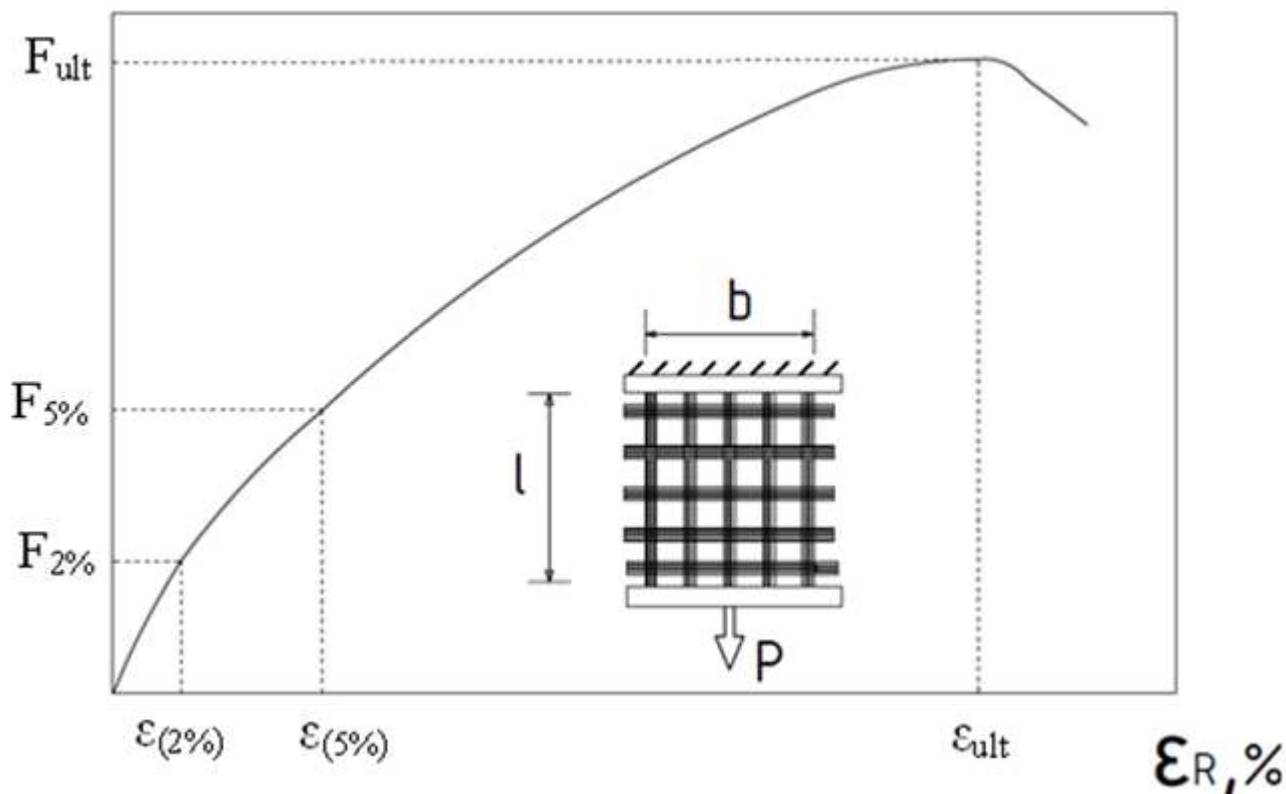


Рисунок 6 - Диаграмма растяжения геосинтетического материала

Ниже приведены эти параметры для различных силовых материалов – полиэфирных геосеток, высокопрочного тканого геотекстиля из полиэфира и полипропилена (таблицы 2-4).

Таблица 2 - Технические характеристики полиэфирных геосеток АРМОСТАБ-АР

Геоматериал	Прочность при разрыве, $F_{ult}$ , кН/м (по основе)	Удлинение при разрыве, $\epsilon_{ult}$ , % (по основе)	Усилие, вызывающее 2% удлинение, $F_{2\%}$ , кН/м (по основе)	Усилие, вызывающее 5% удлинение, $F_{5\%}$ , кН/м (по основе)
Армостаб АР 30	30	<12,5	6,0	10,5
Армостаб АР 40	40	<12,5	7,5	14,0
Армостаб АР 50	50	<12,5	9,0	15,0
Армостаб АР 60	60	<12,5	9,5	16,0
Армостаб АР 80	80	<12,5	11,0	25,0
Армостаб АР 100	100	<12,5	18,0	30,0
Армостаб АР 150	150	<12,5	27,0	46,0
Армостаб АР 200	200	<12,5	35,0	60,0
Армостаб АР 300	300	<12,5	52,0	90,0
Армостаб АР 400	400	<12,5	72,0	110,0

На рисунке 7 информация приведена в графической форме для возможности интерполяции. График на рисунке 8 позволяет определять осевую жесткость

геосинтетического материала для использования в программе Plaxis и для расчета дорожных одежд по ОДМ 218.5.002.2008 «Методические рекомендации по применению полимерных геосеток (георешеток) для усиления слоев дорожной одежды из зернистых материалов».

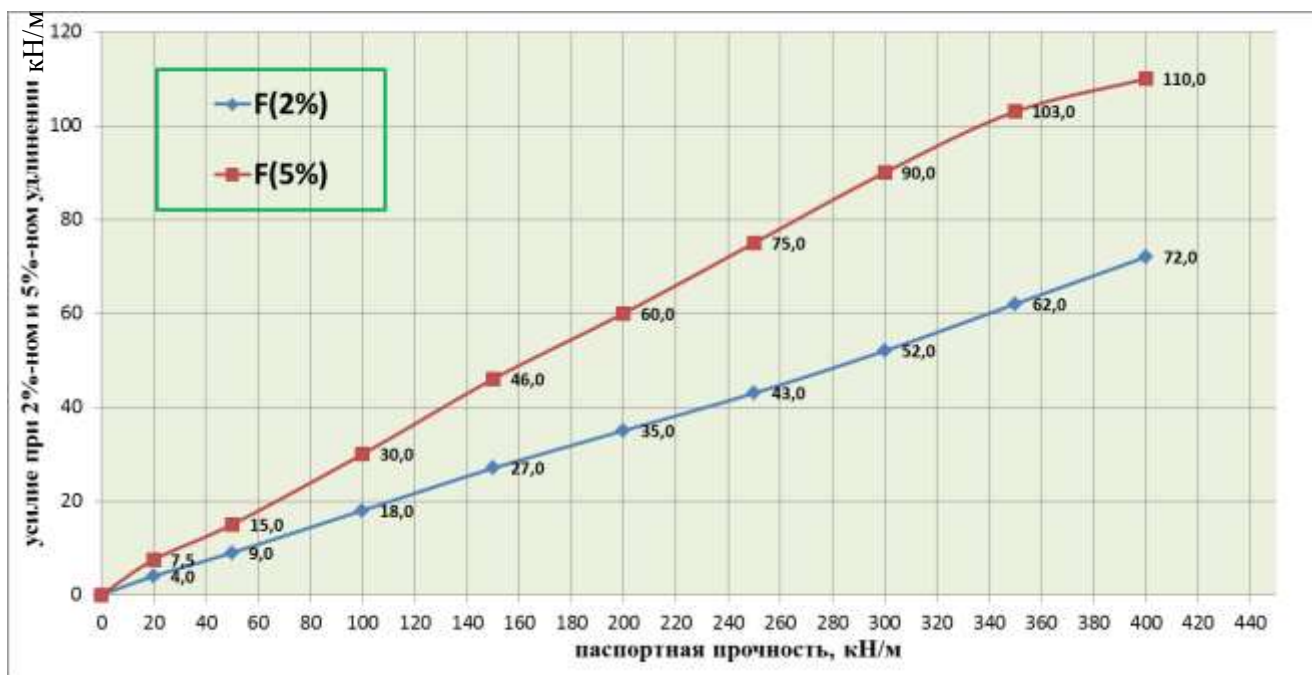


Рисунок 7 – Усилия при 2%-ном и 5%-ном удлинении в зависимости от паспортной прочности

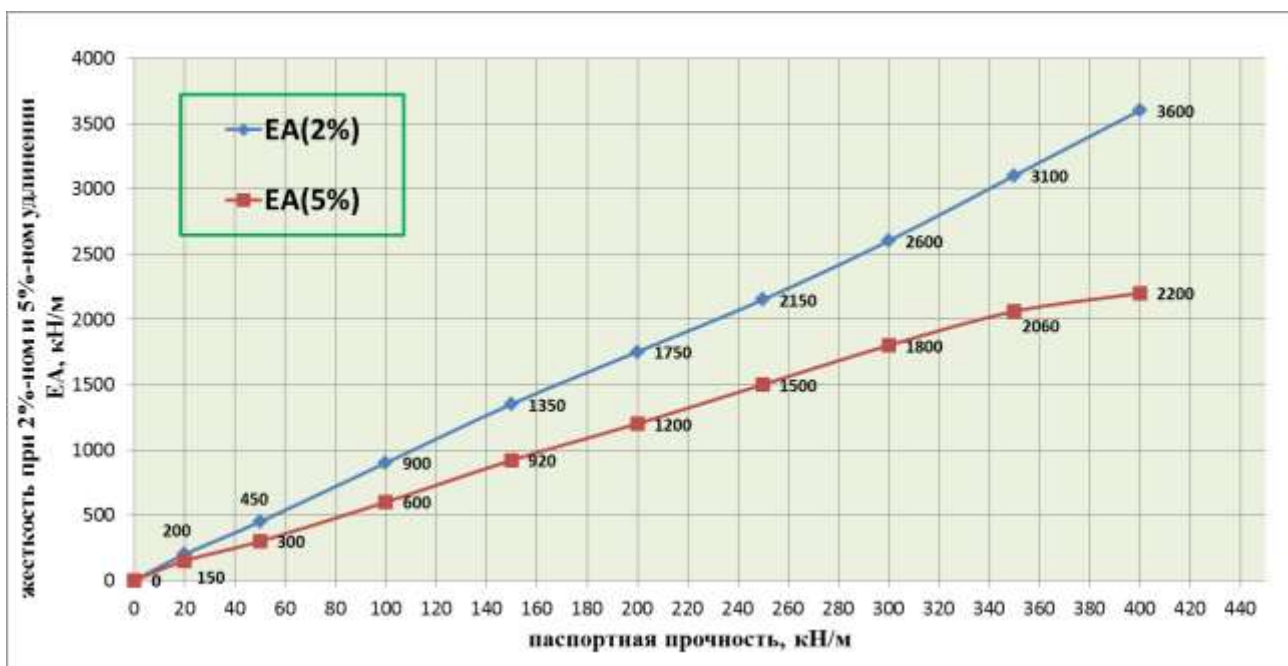
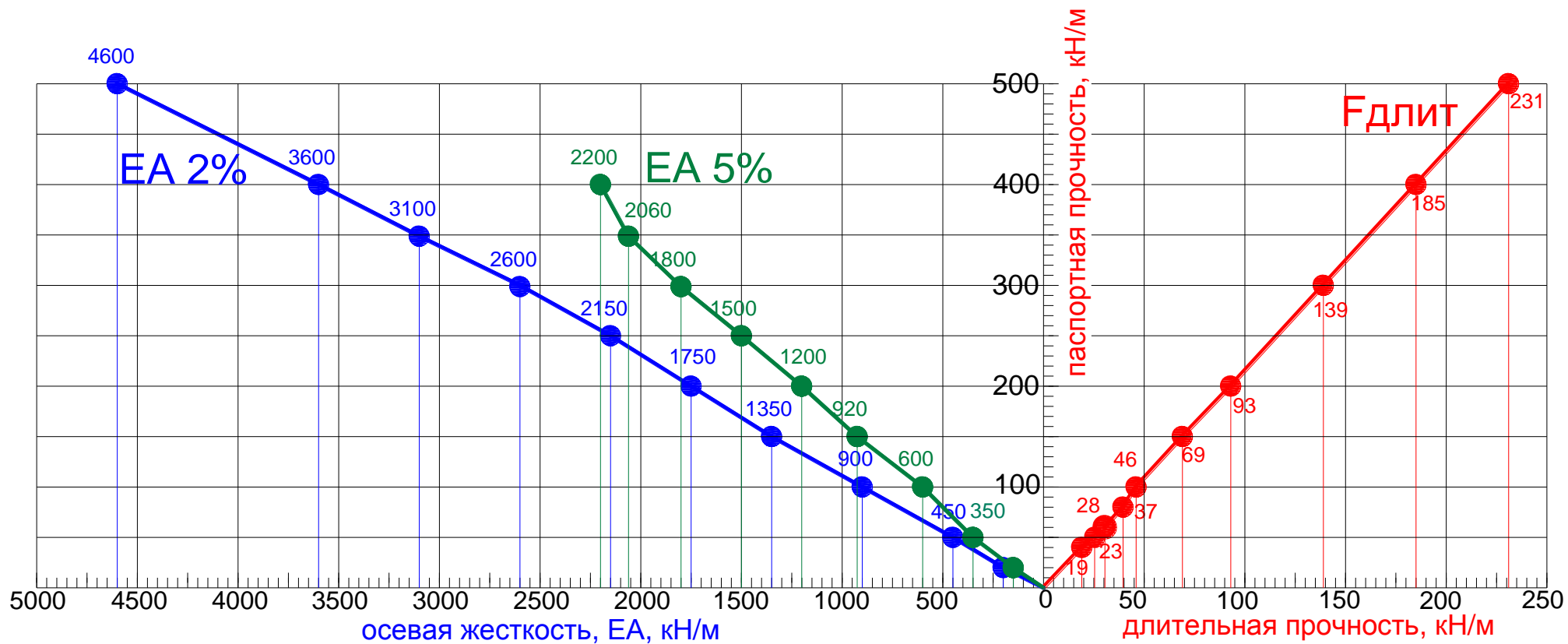


Рисунок 8 – Осевая жесткость при 2%-ном и 5%-ном удлинении в зависимости от паспортной прочности



*Рисунок 9 – Графики для определения длительной прочности и осевой жесткости, соответствующих определенной паспортной прочности для полиэфирных геосеток*

Таблица 3 - Технические характеристики высокопрочного тканого полиэфирного геотекстиля АРМОСТАБ ПЭТ

Геоматериал	Разрывная нагрузка, кН/м		Удлинение при разрыве, %	Усилие, вызывающее 6% удлинение, кН/м (по основе)
	вдоль	поперек		
Армостаб 100/50	100	50	10±2	60
Армостаб 100/100	100	100	10±2	70
Армостаб 150/50	150	50	10±2	75
Армостаб 200/50	200	50	10±2	100
Армостаб 200/100	200	100	10±2	100
Армостаб 300/50	300	50	10±2	150
Армостаб 300/100	300	100	10±2	150
Армостаб 300/300	300	300	10±2	150
Армостаб 400/50	400	50	10±2	200
Армостаб 400/100	400	100	10±2	200
Армостаб 500/50	500	50	10±2	250
Армостаб 500/100	500	100	10±2	250
Армостаб 600/100	600	100	10±2	300
Армостаб 800/100	800	100	10±2	400
Армостаб 1000/100	1000	100	10±2	500

Таблица 4 - Технические характеристики тканого полипропиленового геотекстиля АРМОСТАБ-ПП

Геоматериал	Разрывная нагрузка, кН/м		Удлинение при разрыве, %	
	вдоль	поперек	вдоль	поперек
Армостаб-ПП 18	≥ 18	≥ 12	17	15
Армостаб-ПП 20	≥ 20	≥ 18	17	15
Армостаб-ПП 25	≥ 25	≥ 25	16	15
Армостаб-ПП 33	≥ 33	≥ 33	16	15
Армостаб-ПП 40	≥ 40	≥ 40	15	15
Армостаб-ПП 50	≥ 50	≥ 50	15	15
Армостаб-ПП 60	≥ 60	≥ 60	15	15
Армостаб-ПП 70	≥ 70	≥ 70	15	15
Армостаб-ПП 80	≥ 80	≥ 80	15	15
Армостаб-ПП 100	≥ 100	≥ 100	15	15

### Долгосрочная проектная прочность

Геоматериалы, как и любые другие материалы, с течением временем теряют свою прочность. Соответственно, при проектировании сооружений необходимо учитывать долгосрочную (длительную) проектную прочность материала, а не первоначальную (паспортную). Реологические испытания позволяют моделировать поведение

геоматериалов в зависимости от времени. Существуют различные методики определения проектной прочности ( $F_{дл}$ ). В основу положено уменьшение паспортной прочности ( $F_{ult}$ ) за счет понижающих коэффициентов. «Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах» и **ОДМ 218.5.003-2010** регламентирует подбор типа геосинтетического материала исходя из сравнения расчетного растягивающего усилия ( $F_{расч}$ ) и длительной прочности ( $F_{дл}$ ):

$$F_{расч} \leq F_{дл} = \frac{F_{ult} \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4}{\gamma_b}, \quad (1)$$

где  $F_{расч}$  – усилие в геосинтетической прослойке, полученное по результатам расчета, кН;

$F_{ult}$  – паспортная прочность геосинтетического материала, кН;

$F_{дл}$  – длительная прочность геосинтетического материала, кН;

$A_1$  ( $1/R_{FCR}$ ) – коэффициент учета ползучести;

$A_2$  ( $1/R_{FD}$ ) – коэффициент учета повреждения материала при транспортировке и укладке;

$A_3$  – коэффициент учета взаимного перекрытия, учитывающий наличие стыков и нахлестов соседних полотен - рекомендуется принимать равным 1; (однако по ОДМ 218.5.003-2010  $A_3=0,8$ );

$A_4$  ( $1/R_{FD}$ ) – коэффициент учета влияния окружающей среды;

$\gamma_b$  – коэффициент запаса, принят равным 1,25.

В **Пособии по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах** (п.4.80) приведена похожая формула, только для обратного расчета, где расчетная прочность на растяжение геосинтетического материала  $F_k$  выражена через требуемую прочность  $F_d$  (с теми же понижающими коэффициентами, что и в ОДМ, а  $\gamma_b$  принят равным 1,75):

$$F_k = \frac{F_d}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \gamma_b} \quad (2)$$

Однако применимость ее сомнительна, поскольку коэффициенты  $A_1$ - $A_4$  меньше 1, а коэффициент  $\gamma_b$  больше 1, однако они находятся по одну сторону от знака деления.

В последнем утвержденном документе **ОДМ 218.2.047-2014** расчетное значение длительной прочности геосинтетического материала определяется по формуле:

$$T = \frac{T_{\text{нор}}}{K_{\text{общ}} \cdot \gamma_b}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{нор}}$  – нормативная прочность геосинтетического материала, кН/м;  $\gamma_b$  – коэффициент запаса для геосинтетического материала;  $K_{\text{общ}}$  – общий коэффициент, учитывающий влияние факторов ухудшения свойств, определяется в виде произведения отдельных коэффициентов по формуле:

$$K_{\text{общ}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_7, \quad (4)$$

где  $K_1, \dots, K_7$  – коэффициенты, учитывающие влияние определенного фактора или группы факторов:

- коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений структуры ( $K_1$ );
- коэффициент, учитывающий снижение прочности от ползучести ( $K_2$ );
- коэффициент, учитывающий снижение прочности от ухудшения свойств ниточных и сварных швов или прочности соединения элементов структуры материала ( $K_3$ );
- коэффициент, учитывающий снижение прочности от атмосферных воздействий ( $K_4$ );
- коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред ( $K_5$ );
- коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия микроорганизмов ( $K_6$ );
- коэффициент, учитывающий снижение прочности от температуры ( $K_7$ ).

Величина коэффициент запаса  $\gamma_b$  в документе не приведена. В документе также отсутствуют рекомендуемые величины коэффициентов  $K_{1...7}$ . Для случая, если отсутствуют испытания материала их можно найти в **ОДМ 218.2.046-2014** «Рекомендации по выбору и контролю качества геосинтетических материалов,

применяемых в дорожном строительстве».

В иностранных нормативных документах расчетная прочность вычисляется следующим образом:

- согласно **GRI (Geosynthetic Research Institute)**:

$$T_{allow} = \frac{T_{ult}}{(FS_{ID} \cdot FS_{CR} \cdot FS_{CD} \cdot FS_{BD} \cdot FS_{JNT})} \quad (5)$$

где:  $FS_{ID}$  – коэффициент учета повреждения материала при укладке;  
 $FS_{CR}$  – коэффициент учета ползучести;  
 $FS_{CD}$  – коэффициент учета влияния химической агрессии окружающей среды;  
 $FS_{BD}$  – коэффициент учета влияния биологической агрессии окружающей среды;  
 $FS_{JNT}$  – коэффициент учета взаимного перекрытия.

- согласно Британскому Стандарту **BS 8006-1:2010**:

$$T_D = \frac{T_{CR}}{f_m} = \frac{T_{short-term}/RF_{CR}}{RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s} \quad (6)$$

где:  $T_D$  – длительная прочность  
 $T_{short-term}$  – кратковременная (номинальная) прочность  
 $RF_{CR}$  – коэффициент снижения за счет ползучести  
 $RF_{ID}$  – коэффициент учета повреждения материала при укладке  
 $RF_W$  – коэффициент учета ультрафиолетового воздействия  
 $RF_{CH}$  – коэффициент учета влияния химической агрессии окружающей среды  
 $f_s$  – коэффициент запаса при обработке данных

- согласно **FHWA (Federal Highway Administration)**:

$$T_{allow} = \frac{T_{ult}}{(F_D \cdot F_{ID} \cdot F_{CR})} \quad (7)$$

где:  $F_D$  – фактор повреждения вследствие химической агрессивности грунта;  
 $F_{ID}$  – фактор повреждения при установке материала;  
 $F_{CR}$  – фактор повреждения за счет ползучести.

В целом можно отметить, что основными коэффициентами снижения прочности во всех видах документов являются:

- учитывающие ползучесть;
- учитывающие повреждение при установке;
- учитывающие воздействие окружающей среды (могут быть разделены на химическое и ультрафиолетовое).



## **Испытания геосинтетического материала на ползучесть (определение коэффициента $A_1$ ( $k_2$ ))**

Ползучесть — это изменение прочностных и деформационных свойств материала во времени при постоянном значении нагрузки.

Методика испытания геосинтетического материала на ползучесть при растяжении или разрыве при ползучести, согласно ОДМ 218.5.006-2010 (п.7.3), предусматривает длительное растяжение образца постоянной растягивающей нагрузкой. При испытаниях образец выдерживают под нагрузкой в течение 1000 ч (около 42 дней). При необходимости – при более длительном времени нагружения, например, до 10 000 ч для новых (неиспытанных) материалов.

В зарубежных нормах, помимо традиционного испытания на ползучесть и разрыв, применяется также ускоренный метод (SIM) - интервальный изотермический метод, при котором кривые ползучести материала строятся на основе серии экспериментов при постоянной нагрузке при интервальном изменении температуры (нагревании) в широком диапазоне. Использование этого метода уменьшает время, требуемое для проявления ползучести.

Выделяют также метод температурно-временной аналогии, сущность которого заключается в измерении ползучести при одном уровне нагрузки, но при различных температурах для получения единой обобщенной кривой.

Для интерпретации результатов теста на ползучесть строят кривые ползучести при растяжении, т.е. зависимость «относительное удлинение – время», в полулогарифмической шкале (рисунок 10а). По горизонтальной оси откладывается время, по вертикальной – относительное удлинение при различных нагрузках  $F$ .

Далее строят изохронную кривую «нагрузка – относительное удлинение» для различных величин растягивающей нагрузки (в % от разрывной прочности) при заданном времени  $t$  (рисунок 10б).

Для большего количества часов (1000 000 ч = 120 лет) результаты экспериментов экстраполируются (графическим путем или с использованием степенной функции – согласно ОДМ 218.2.047-2014).

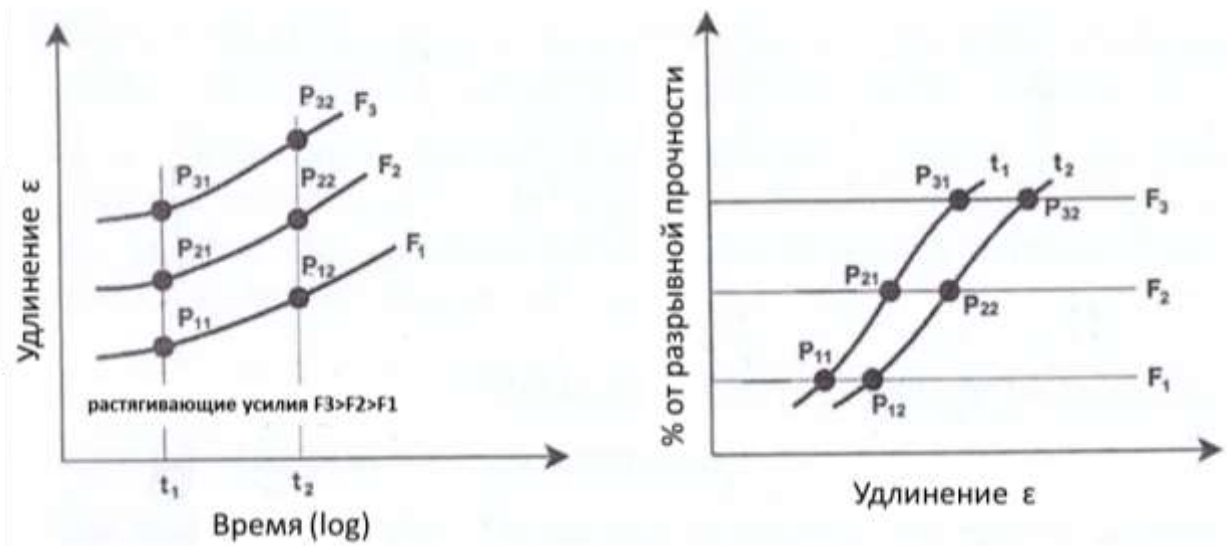


Рисунок 10 – а) кривые «относительное удлинение – время» для различных растягивающих усилий  $F$ ; б) изохронная кривая «удлинение – время» при заданном времени  $t$ .

На рисунке 11 приведены изохронные кривые для материала АРМОСТАБ ПЭТ 1000/100, полученные в ходе испытаний в «НИИ ТСК» (2014 г).

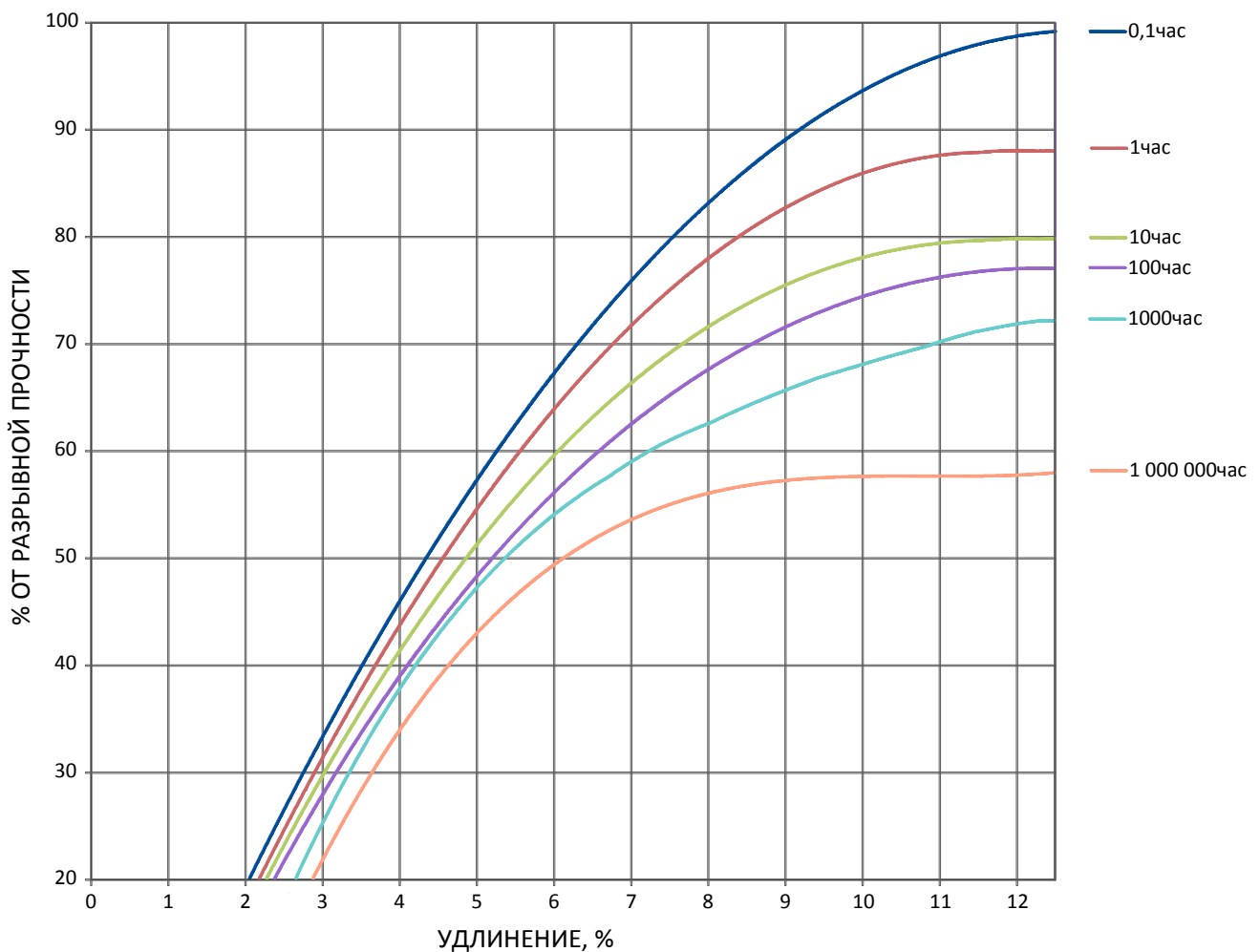


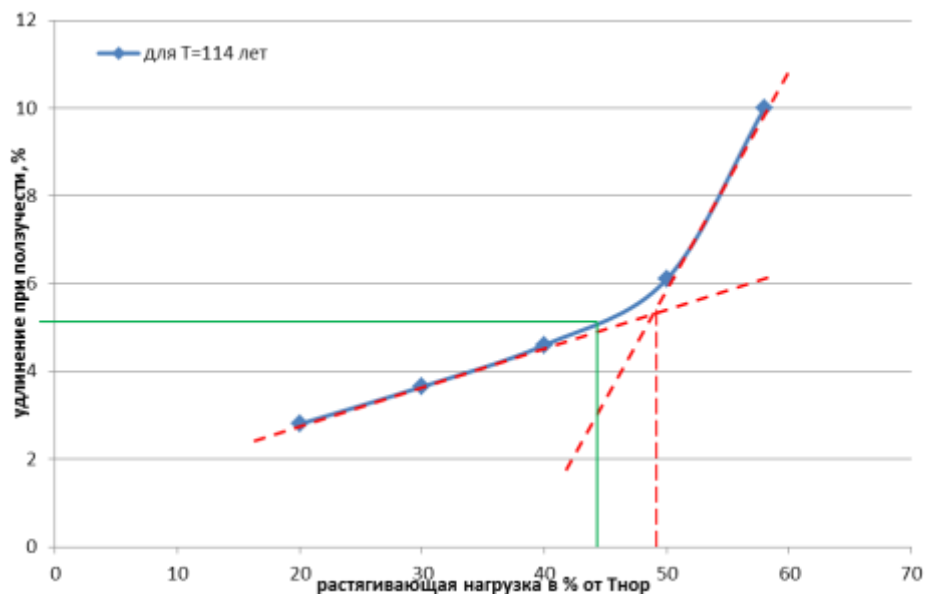
Рисунок 11 – Изохронные кривые для материала АРМОСТАБ ПЭТ 1000/100

Принцип использования изохронных кривых заключается в том, что при выполнении расчетов задаются допустимым удлинением (таблица 5) и по нему находят процент от разрывной прочности, и таким образом определяют понижающий коэффициент  $A_1$  в формуле (1).

Таблица 5 – Максимально допустимые значения относительного удлинения армирующих геосинтетических материалов при расчетах по второму предельному состоянию в соответствии с **Инструкцией ГТВ 429/2007 (Польша)**

Тип конструкции	Максимально допустимое значение относительного удлинения $\epsilon_{\text{макс}}$ , %
Самонесущие подпорные стены с облицовкой жесткого типа, не подверженные влиянию внешних нагрузок и воздействий	6,0
Насыпи и подпорные стены в дорожном строительстве	5,0
Насыпи и подпорные стены в железнодорожном строительстве	2,0
Устои мостовых сооружений	2,0
В том числе относительное удлинение за весь период эксплуатации сооружения ( $\Delta\epsilon$ )	0,5

Согласно ОДМ 218.2.047-2014, кривые ползучести используются для определения максимально допустимого уровня нагрузки. При этом в одном случае находится нагрузка, которая не будет оказывать существенного влияния на ползучесть материала, в другом – нагрузка, соответствующая допускаемой величине деформации (относительного удлинения). Так, если определять максимально допустимый уровень нагрузки для материала (**АРМОСТАБ ПЭТ 1000/100**), для которого построена изохронная кривая на рис. 11, воспользуемся изохронной кривой для времени  $t=114$  лет (1'000'000 часов), изображенной на рисунке 12: тогда для первого случая допустимая нагрузка = 48% от разрывной прочности (1000 кН/м) = 480 кН/м; для второго случая, когда имеются ограничения по деформации, например, 5%, получим, что допустимая нагрузка равна 44% от разрывной прочности (1000 кН/м) = 440 кН/м.



**Рисунок 12 – Изохронная кривая «растягивающая нагрузка – относительное удлинение» при заданном времени  $t=1000000$  часов (114 лет)**

Определим коэффициент, учитывающий снижение прочности от ползучести материала ( $k_2$ ) по формуле (ОДМ 218.2.047-2014):

$$k_2 = \frac{T_0}{T_K}, \quad (8)$$

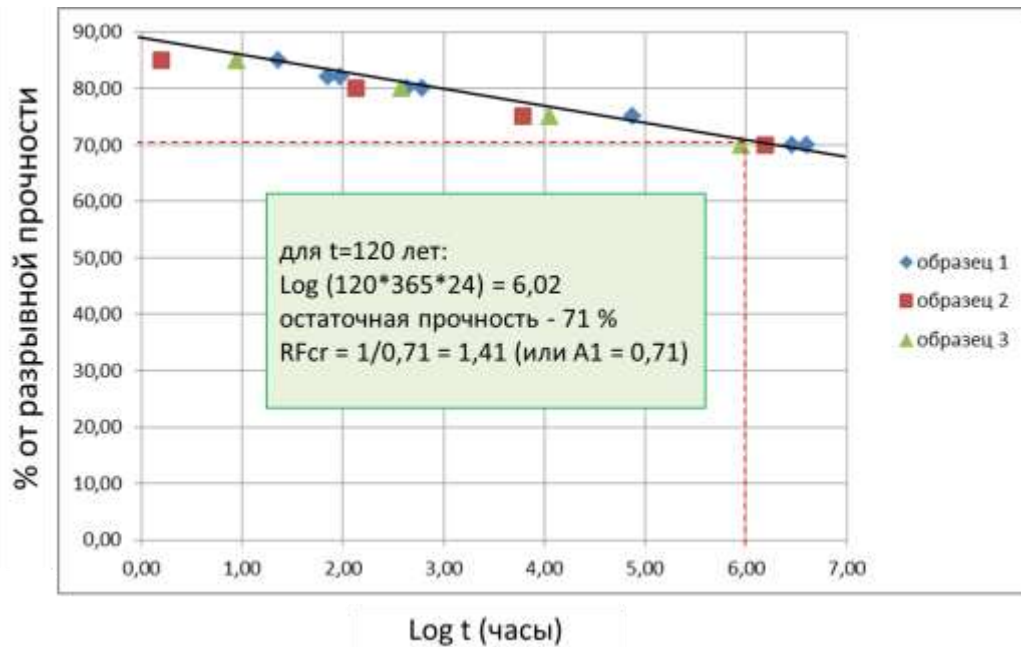
где  $T_K$  – прочность при растяжении образца материала, равная нагрузке, которая не оказывает существенного влияния на ползучесть материала, кН/м;

$T_0$  – прочность при растяжении исходного образца, кН/м.

$$k_2 = \frac{1000}{480} = 2,08 \text{ – для 1-го варианта;}$$

$$k_2 = \frac{1000}{440} = 2,27 \text{ – для 2-го варианта.}$$

На примере испытаний на ползучесть по ускоренному температурному методу (SIM, или метод ступенчатых изотерм) ниже показано, как по кривой ползучести определить длительную прочность материала (рисунок 13).



**Рисунок 13 - Кривая длительной прочности при испытании полиэфирных геосеток ускоренным (температурным) методом**

Пример определения коэффициента  $A1$  (рисунок 13):

Для проектного периода эксплуатации, равного **120** годам вычисляем логарифм времени в часах:

$$\text{Log}(120 \text{ лет} \cdot 365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}) = 6,02$$

Определяем по графику % остаточной прочности - 71%

Снижающий коэффициент за счет ползучести (через 120 лет при температуре 20°C):

$$\text{RFcr} = 1 / 0,71 = 1,41 \text{ или } A1 = 0,71.$$

Для проектного периода эксплуатации, равного **50** годам:

$$\text{Log}(50 \text{ лет} \cdot 365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа}) = 5,64$$

Определяем по графику % остаточной прочности - 72%

Снижающий коэффициент за счет ползучести (через 50 лет при температуре 20°C):

$$\text{RFcr} = 1 / 0,72 = 1,39 \text{ или } A1 = 0,72.$$

В числе влияющих на долговременную прочность материала факторов, помимо ползучести, механического повреждения, исследуется воздействие окружающей среды, в том числе: влияние ультрафиолетового излучения, биологическая и химическая агрессия, морозостойкость. Действующий ОДМ 218.5.006-2010 «Рекомендации по методикам испытаний геосинтетических материалов в зависимости от области их применения в дорожной отрасли» содержит описание большого количества различных методов испытаний (в том числе устойчивость к микроорганизмам, многократному замораживанию-оттаиванию, определение гибкости при низких температурах и пр.).

Ниже приведены частные примеры понижающих коэффициентов  $k_{1..7}$  (исключая  $k_2$  и  $k_3$ ) по ОДМ 218.2.047-2014 для полиэфирных силовых материалов (таблица 6).

Таблица 6 – Коэффициенты долговечности, учитывающие влияние определенной группы факторов для полиэфирной геосетки Армостаб Грунт АР-2П 80/80

<b>Фактор или группа факторов</b>	<b>Коэффициент</b>	<b>Значение коэффициента</b>
Механических повреждений структуры	$K_{11}$	1,03
	$K_{12}$	1,01
	$K_{13}$	1,03
Ультрафиолетовое излучение	$K_4$	1,04
Агрессивная среда	$K_5$	1,05
Микроорганизмы	$K_6$	1,01
Морозостойкость	$K_7$	1,03
	$K_{общ}$	1,2

Стоит отметить то обстоятельство, что на момент написания этой брошюры в России не было единого стандарта по проведению испытаний геосинтетических материалов. Все, что накоплено с 70-х годов прошлого века, относится к нетканым геотекстилям (типа «Дорнит»). Что касается более новых силовых материалов, то разные лаборатории (аккредитованные, сертифицированные и работающие не первый год) выдают на один и тот же материал разные значения прочности при разрыве и еще более отличающиеся друг от друга удлинения. Это связано с использованием зажимов разного типа (блочные, барабанные) и практически полным отсутствием научного развития этой области знаний. За рубежом проводятся испытания, более приближенные к реальному поведению армирующих прослоек путем растяжения их в приборах кольцевого типа (Резяпкин И.П. «Применение геосинтетических материалов для усиления конструкций аэродромных одежд» Airports International, выпуск №3, март 2014).

Отсутствие опыта проведения испытаний геосинтетических материалов у лабораторий, отсутствие научно-исследовательских организаций, работающих в этой области, приводит к большим разногласиям участников испытаний. Поэтому многие характеристики, являются сомнительными, но не могут быть оспорены, поскольку официально испытания проводит только одна лаборатория.

В таблицах 7-10 и на рисунке 14 приведены данные о понижающих коэффициентах и длительной прочности силовых геосинтетических материалов на основании испытаний, проведенных в лаборатории ГК «Миакон».

Таблица 7 - Понижающие коэффициенты и длительная прочность полиэфирных геосеток

Показатель		АРМОСТАБ- АР 40	АРМОСТАБ -АР 50	АРМОСТАБ -АР 60	АРМОСТАБ- АР 80	АРМОСТАБ- АР 100	АРМОСТАБ- АР 200	АРМОСТАБ- АР 300	АРМОСТАБ- АР 400	АРМОСТАБ- АР 600	АРМОСТАБ- АР 800	АРМОСТАБ- АР 1000
Паспортная разрывная прочность, $F_{ult}$ кН/м		40	50	60	80	100	200	300	400	600	800	1000
Коэффициент учета ползучести $A_1$ (120 лет)	20 <sup>0</sup> С	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	30 <sup>0</sup> С	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
	40 <sup>0</sup> С	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Коэффициент учета повреждения материала при укладке $A_2$	песок, супесь	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	щебень	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Коэффициент учета взаимного перекрытия $A_3$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Коэффициент учета влияния окружающей среды $A_4$	рН 2-4	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
	рН 4-9	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
	рН 9-10	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Коэффициент запаса $\gamma_b$		1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Суммарный коэффициент снижения прочности (120 лет, рН 4-9, 20 <sup>0</sup> С)	песок, супесь	$A_1$ (120 лет, 20 <sup>0</sup> С)* $A_2$ (песок, супесь)* $A_3$ * $A_4$ (рН 4-9)/ $\gamma_b = 0,70*0,95*1*0,87 = 0,58$										
	щебень	$A_1$ (120 лет, 20 <sup>0</sup> С)* $A_2$ (щебень)* $A_3$ * $A_4$ (рН 4-9)/ $\gamma_b = 0,70*0,87*1*0,87 = 0,52$										
Длительная прочность $F_{дл}$ , кН/м (120 лет, рН 4-9, 20 <sup>0</sup> С)	песок, супесь	<b>19</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>37</b>	<b>46</b>	<b>93</b>	<b>139</b>	<b>185</b>	<b>278</b>	<b>370</b>	<b>463</b>
	щебень	<b>17</b>	<b>21</b>	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>42</b>	<b>85</b>	<b>127</b>	<b>170</b>	<b>254</b>	<b>339</b>	<b>424</b>



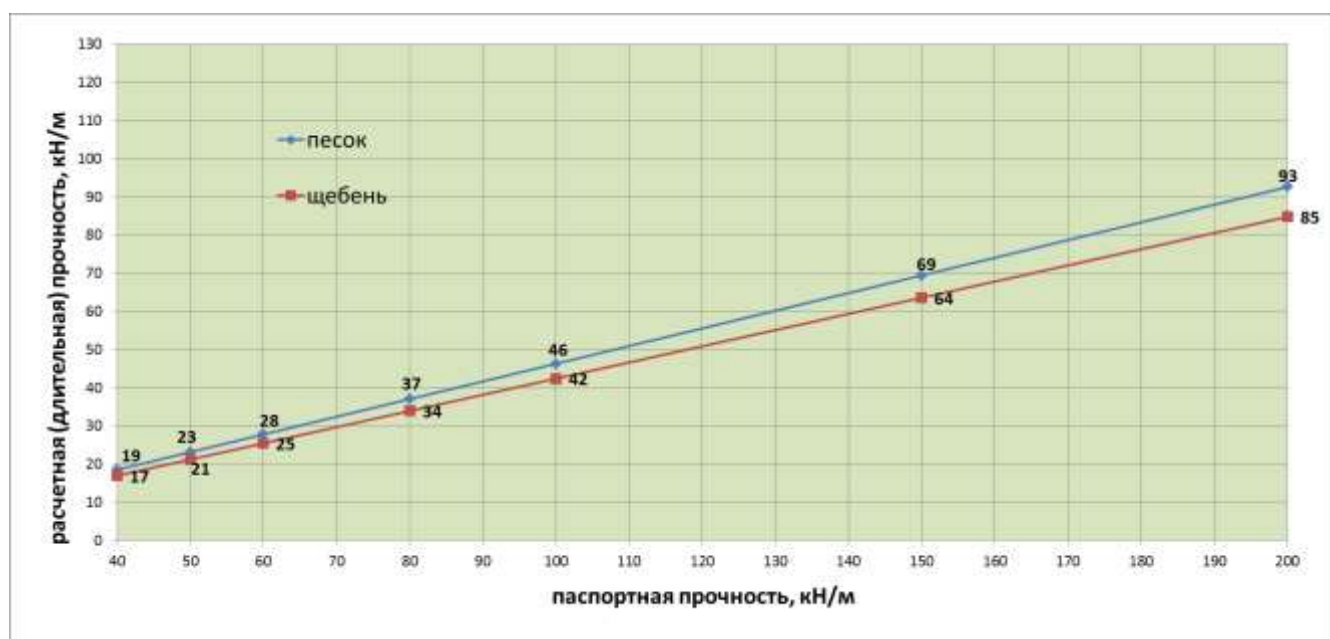


Рисунок 14 – Вверху - график зависимости длительной (расчетной) прочности от паспортной (номинальной) (120 лет, 4-9 рН, 20<sup>0</sup>С) для полиэфирных геосеток; внизу – увеличенный фрагмент графика

Таблица 8 - Значения коэффициента учета ползучести для высокопрочного геотекстиля из полиэфира (АРМОСТАБ-ПЭТ) – А1

Показатель снижения прочности за счет ползучести	1 год	2 года	5 лет	10 лет	60 лет	120 лет
A1	0,72	0,71	0,70	0,69	0,67	0,66
Rfcreep =1/A1	1,39	1,41	1,43	1,45	1,49*	1,52*

\* - по испытаниям НИИ ТСК для материала АРМОСТАБ-ПЭТ

Таблица 9 - Значения коэффициента учета механического повреждения в процессе укладки для высокопрочного геотекстиля из полиэфира (АРМОСТАБ-ПЭТ) - А2

Геоматериал АРМОСТАБ ПЭТ	Состав грунта		
	Песок (D90<2 мм)	Гравий (D90<32 мм)	Щебень (D90<63 мм)
100/50	0,85	0,80	0,74
150/45	0,85	0,80	0,74
200/45	0,85	0,80	0,74
300/45	0,91*	0,83*	0,78*
400/50	0,93	0,89	0,88
400/100	0,93	0,89	0,88
600/50	0,93	0,89	0,88
600/100	0,93*	0,89*	0,88*
800/100	0,93	0,89	0,88
1000/100	0,93*	0,89*	0,88*

\* - по испытаниям НИИ ТСК для материала АРМОСТАБ-ПЭТ

Таблица 10 - Значения коэффициента учета агрессивности окружающей среды (рН) для высокопрочного геотекстиля из полиэфира (АРМОСТАБ-ПЭТ) – А4

Показатель снижения прочности за счет влияния окружающей среды	рН 2,0-4,0	рН 4,0-9,0	рН 9,0-9,5
А4	0,66*	0,91*	0,66*

\* - по испытаниям НИИ ТСК для материала АРМОСТАБ-ПЭТ

Ниже приведем некоторые рекомендации по назначению понижающих коэффициентов при расчете длительной прочности геосинтетических материалов из иностранных источников.

### 1. Коэффициент учета ползучести $RF_{CR}$ (соответствует российскому коэффициенту 1/А1):

В отсутствие конкретных данных общий коэффициент по умолчанию  $RF_{CR} = 2,0$  для полиэфира и  $RF_{CR} = 4,0$  для полипропиленовых материалов (Greenwood and Shen, 1994, Koerner, 1994).

Другие авторы (Zornberg and Leshchinsky, 2001) предлагают следующие значения:

Таблица 11 – Рекомендуемые в иностранной литературе коэффициенты снижения прочности за счет ползучести  $RF_{CR}$  для различных материалов

Сырье	$RF_{CR}$
Полиэфир	2,5
Полипропилен	5,0
Полиэтилен	5,0
Арамид	2,5
Полиамид	2,5

**2. Коэффициент снижения прочности при укладке  $RF_{ID}$  (соответствует российскому коэффициенту 1/A2):**

Таблица 12 – Максимальные значения коэффициентов снижения прочности  $RF_{ID}$  при укладке геоматериала (Hufenus, 2002)

<i>Материал</i>	<i>Мелкозернистый грунт</i>	<i>Окатанный среднезернистый грунт</i>	<i>Неокатанный среднезернистый грунт</i>
<i>Одноосноориентированная георешетка из полиэтилена высокой плотности (HDPE)</i>	1,1	1,2	1,4
<i>Двуосноориентированная полипропиленовая георешетка</i>	1,2	1,3	1,5
<i>Полиэфирная геосетка</i>	1,1	1,1	1,1
<i>Полиэфирная геосетка в оболочке</i>	1,1	1,2	1,3
<i>Нетканый PP и PET геоматериал</i>	1,1	1,4	1,5

По другим данным (таблица 13) значения этих коэффициентов существенно отличаются от приведенных выше, что делает затруднительным выбор расчетного коэффициента:

Таблица 13 – Максимальные значения коэффициентов снижения прочности при укладке геоматериала (Bathurst, 2011)

<i>Материал</i>	<i>Для диаметра частиц <math>d_{50} &lt; 19</math> мм</i>	<i>Для диаметра частиц <math>d_{50} &gt; 19</math> мм</i>
<i>HDPE одноосноориентированная георешетка (из полиэтилена высокой плотности)</i>	1,17	1,43
<i>Двуосноориентированная полипропиленовая георешетка</i>	1,11	1,45
<i>Полиэфирная георешетка с ПВХ пропиткой</i>	1,39	1,85
<i>Полиэфирная георешетка с акриловой и PP пропиткой</i>	1,37	2,02
<i>Тканый геотекстиль</i>	1,66	4,93
<i>Нетканый геотекстиль</i>	1,46	4,96

**3. Коэффициент учета влияния химической агрессии окружающей среды  $RF_{CH}$  (соответствует российскому коэффициенту 1/A4):**

Таблица 14 – Максимальные значения коэффициентов учета влияния химической агрессии окружающей среды  $RF_{CH}$  для **полиэфирных армирующих материалов** по ISO TR 20432

<i>Уровень PH</i>	<i>Срок службы</i>	<i>Температура эксплуатации, °C</i>	<i><math>RF_{CH}</math></i>
4-9	25	25	1,0
4-8	100	25	1,2
8-9	100	25	1,3
4-9	25	35	1,4

Для полипропилена и полиэтилена значения коэффициента  $RF_{CH}$  рекомендуется назначать только по результатам тестирования.

В результате расчетов устойчивости получают расчетное растягивающее усилие в армирующей прослойке  $F_{расч}$ , по которому определяют паспортную прочность (рисунок 15). Более жесткие геоматериалы (с большой прочностью) оказывают влияние на равномерность осадки, в этом случае необходимо принимать паспортную прочность по усилию, вызывающему двухпроцентное удлинение.

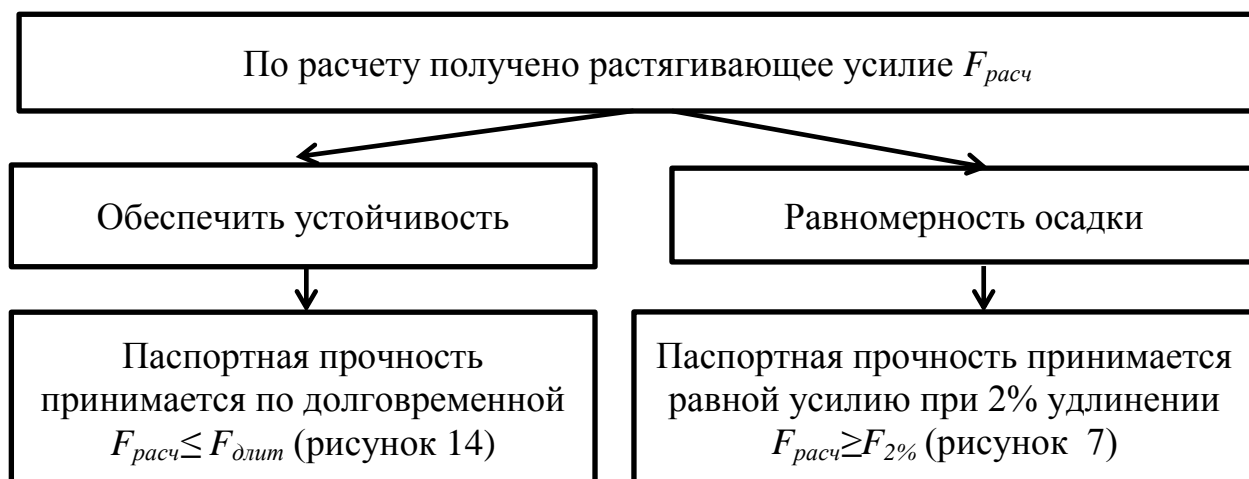


Рисунок 15 - Схема для определения паспортной прочности по расчетному растягивающему усилию

### 3. УЧЕТ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОГРАММАХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты с геосинтетическими материалами в программах, работающих на основе метода конечных элементов (МКЭ), отличаются от расчетов в программах, считающих методами предельного равновесия (МПР). Программы, использующие МПР: GEO5 Устойчивость откоса; GeoStab; GeoStudio (SLOPE/W); SlopeStability; Slide; GGU Stability; DCGeotex; MRE; MacStars 2000, GenID32 и др. Программы МКЭ: Plaxis, GEO5 МКЭ, Phase2 и др., в которых реализован метод снижения прочности (SRM) (Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик. Транспорт Российской Федерации №6 (49) 2013 с. 14-16).

Поведение геосинтетических материалов при растяжении разнообразно и определяется, прежде всего, исходным сырьем. Принцип учета армирующих прослоек в расчетах заключается в нескольких подходах:

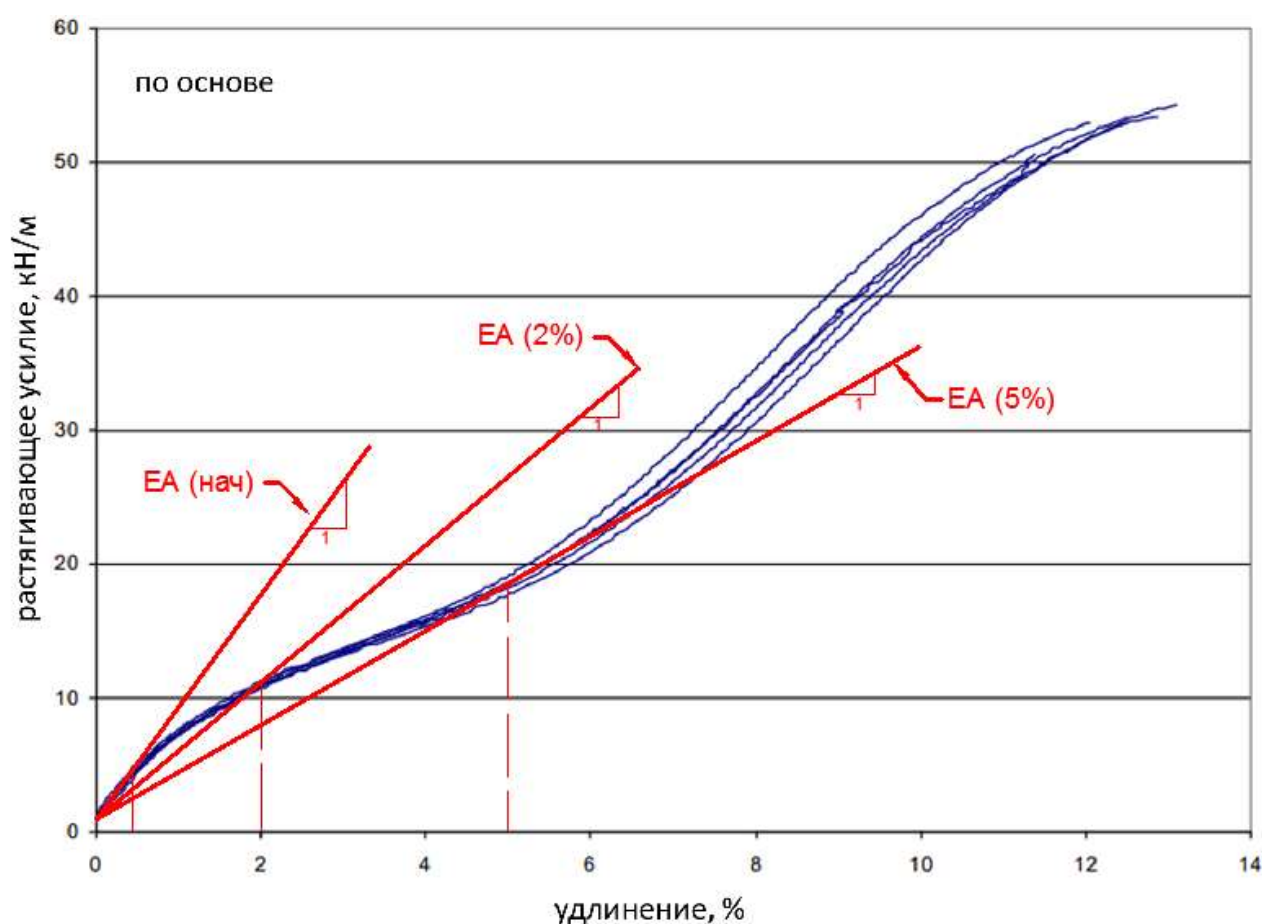
- при расчете дорожных одежд используется условный показатель

деформативности (осевая жесткость), как правило, при 2% удлинении;

- в расчетах устойчивости по методам предельного равновесия (Бишоп, Терцаги, Шахунянц и др.) учитывается только долговременная прочность;

- в программах численного моделирования геосинтетические прослойки задаются через осевую жесткость EA, определяемую отношением растягивающего усилия к соответствующему удлинению.

Поскольку значение EA является коэффициентом пропорциональности между растягивающим усилием и удлинением, его применение предполагает линеаризацию графика «усилие-деформация» (рисунок 16).



**Рисунок 16 – Кривые удлинение - растягивающее усилие при испытании нескольких образцов полиэфирных геосеток на растяжение**

Пример определения разных вариантов жесткости (EA) полиэфирной геосетки по данным испытания материала на растяжение (рисунок 16):

$$EA \text{ (нач)} = F_{\text{нач}} / \varepsilon_{\text{нач}} = 4 \text{ кН/м} / 0,005 = 800 \text{ кН/м}$$

$$EA \text{ (2\%)} = F_{2\%} / \varepsilon_{2\%} = 11 \text{ кН/м} / 0,02 = 550 \text{ кН/м}$$

$$EA \text{ (5\%)} = F_{5\%} / \varepsilon_{5\%} = 18 \text{ кН/м} / 0,05 = 360 \text{ кН/м}$$

Как видно по графику на рисунке 16, поведение геосинтетического материала в осях «нагрузка-удлинение» имеет нелинейный характер. Поэтому для учета в расчетах нелинейно деформирующегося материала необходимо использование нескольких параметров жесткости. Так, жесткость, соответствующая первоначальному линейному отрезку графика, можно назвать начальной жесткостью материала. Ее значение является максимальным. Полагая, что в конструкциях **дорожных одежд** растягивающие усилия невелики (относительно прочности на разрыв) и составляют не более 10 кН/м, следовательно, удлинение материала не будет превышать 1% (что также логично следует из недопустимости возникновения в уплотненных слоях дорожных одежд деформаций более 4 см). Из сказанного следует, что в расчетах дорожных одежд можно принимать начальную жесткость армирующей прослойки.

При расчетах устойчивости МКЭ в первом приближении задается осевая жесткость при 2% удлинении, после выполнения расчета осуществляется проверка расчетного удлинения. Если оно не превысило 2%, результаты фиксируются, если же удлинение более 2%, следует задаться осевой жесткостью 5%, или подобрать геоматериал с большей прочностью и произвести расчет повторно. В целом можно отметить, что 5% жесткость позволяет делать безопасный анализ, поскольку всегда будет давать запас (Вавринюк Т.С., Федоренко Е.В. Принципы моделирования геосинтетических материалов при расчетах устойчивости численными методами. Транспортное строительство. №10 2013 г, с. 25-28).

Следует отметить тот факт, что в программе Plaxis следует назначать кроме осевой жесткости EA еще и предельное значение прочности N. В зависимости от вида расчета это может быть как номинальная прочность, так и долговременная. Этот параметр будет оказывать существенное влияние на значение коэффициента устойчивости.

Что касается вопроса, как задавать осевую жесткость EA по результатам стандартных испытаний на разрыв или с учетом снижения прочности во время эксплуатации, то здесь стоит обратиться к изохронам (рисунок 17). Как видно из рисунка, **наклон** красных линий, показывающих осевую жесткость при стандартном испытании и по экстраполированной на 120 лет кривой, отличается незначительно. Таким образом, использование в качестве расчетной осевой жесткости, полученной по стандартным испытаниям, будет правомерно.

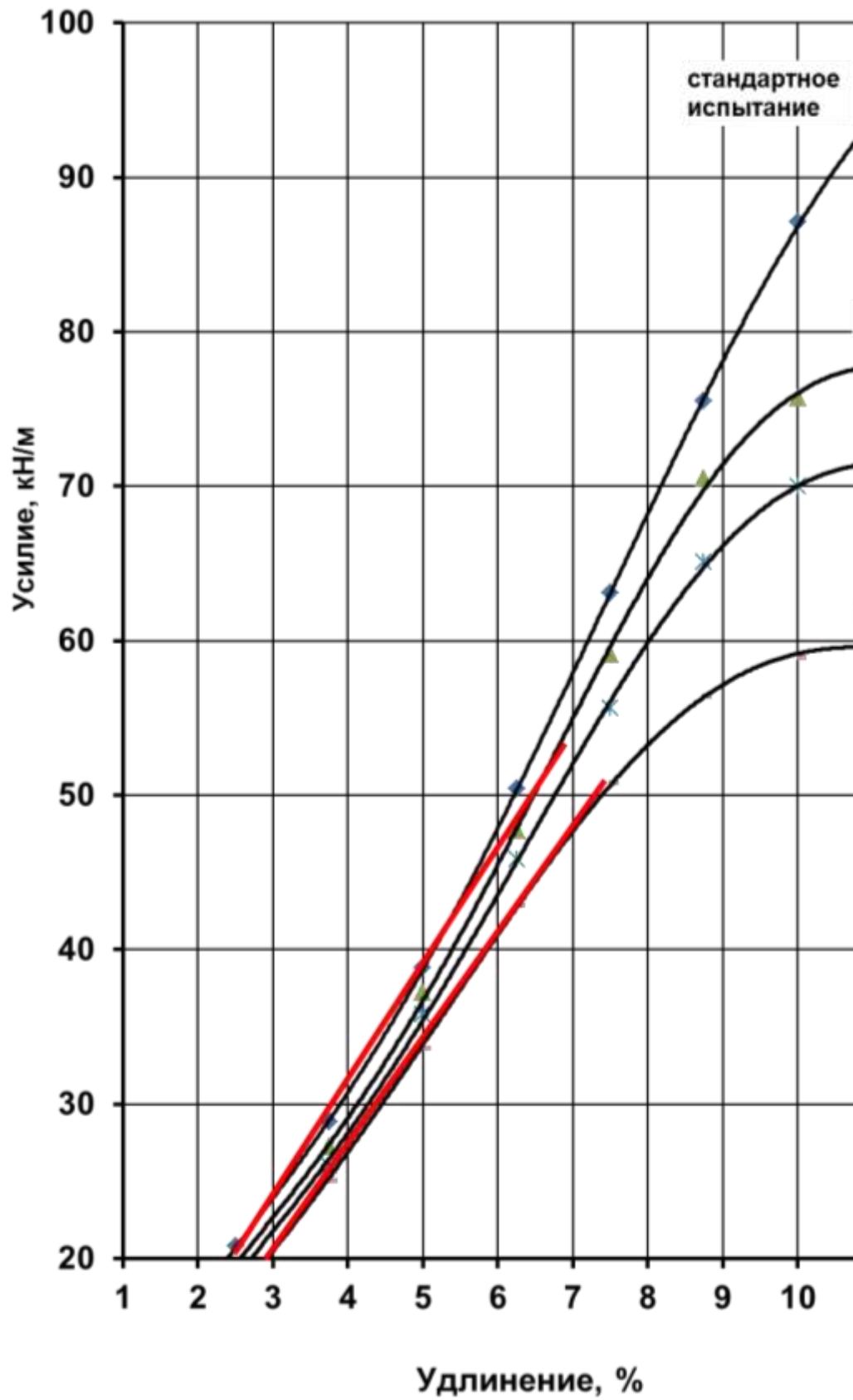


Рисунок 17 - Изохроны для полиэфирной геосетки АРМОСТАБ-АР с прочностью 100 кН/м

## 4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПИ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

### 4.1 Общие положения

Расчеты насыпей на слабом основании предполагают выполнение проверки скорости возведения сооружения. Возведение насыпи с обычной для строительства скоростью может привести к разрушению сооружения в процессе отсыпки (этот вид расчетов называется «быстрое возведение»). В этом случае требуется проверка устойчивости при медленном возведении, т.е. с учетом упрочнения грунта в результате консолидации. Разница этих двух видов расчетов заключается в задании прочностных характеристик. В ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» введено понятие «сопротивление недренированному сдвигу»  $c_u$  или **недренированная прочность**, однако недостаток информации об этом показателе затрудняет его применение в практике. Подробную информацию можно найти в многочисленных зарубежных источниках и в книге Г.Г. Болдырева «Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса» (Монография. Пенза: ПГУАС, 2008.-696 с.).

Если кратко рассмотреть вопрос определения прочности грунтов, то можно выделить три состояния: 1) грунт водонасыщенный, и его прочность очень низкая; 2) грунт консолидированный, и его прочность максимальна; 3) промежуточное состояние. Первое состояние определяется по результатам неконсолидированно-недренированных (НН) испытаний в стабилometре, по методу быстрого сдвига в срезовом приборе или полевыми испытаниями крыльчаткой и применяется при проверке на быстрое возведение. При этом НН испытания и срез сдвигометром крыльчаткой дают значение недренированной прочности  $c_u$ , а срезовые испытания дают низкие значения  $c$  и  $\varphi$ . Эта разница объясняется невозможностью провести испытания водонасыщенного грунта в срезовом приборе. Второе состояние определяется по результатам консолидированно-дренированных (КД) испытаний в стабилometре или по методу медленного сдвига в срезовом приборе и используется при проверке конечного, стабилизированного состояния сооружения.



Таблица 15 - Вид испытаний и получаемые характеристики

Тип возведения насыпи	Трехосные (стабилометр)	Одноплоскостной срез	Полевые (крыльчатка)
Быстрое	НН $c_u$	Быстрый сдвиг с и $\phi$	$c_u$
Медленное	КД, КН с и $\phi$ ( $c'$ и $\phi'$ )	Медленный сдвиг с и $\phi$	-

Для того чтобы оценить состояние насыпи в процессе возведения, т.е. промежуточное состояние, необходимо иметь кривые изменения прочностных характеристик от влажности по методу «плотность-влажность» Н.Н. Маслова (рисунок 18) или иметь возможность использовать численное моделирование, например, программу Plaxis.

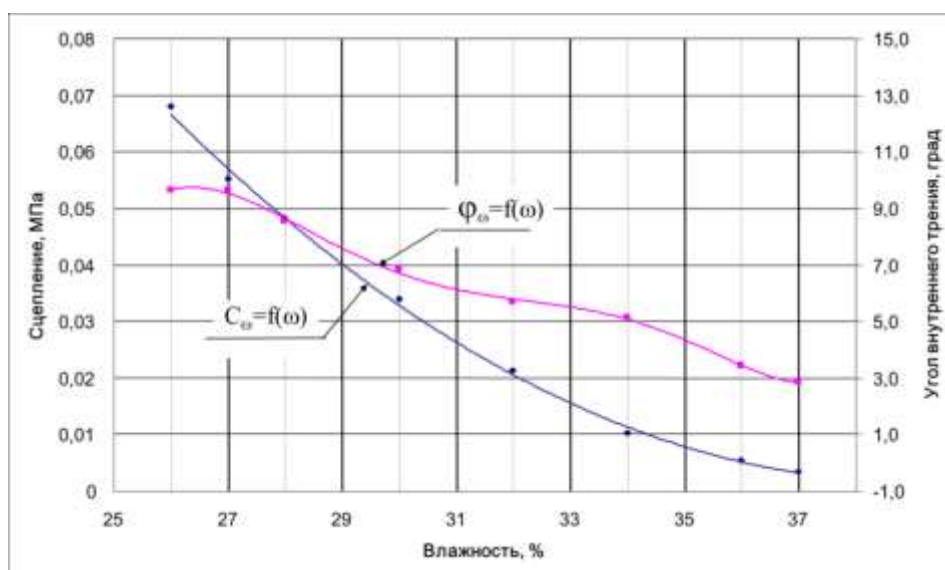


Рисунок 18 - Результаты испытаний по методу «плотность-влажность»

Общий смысл понятия «недренированная прочность» заключается в том, что для водонасыщенного состояния глинистого грунта его прочность не зависит от прикладываемого давления. Это связано с возникновением избыточного порового давления и в графическом представлении, в виде кругов Мора, изображается горизонтальной прямой (рисунок 19). Если из полных напряжений  $\sigma$  вычесть поровое давление  $U$ , то получатся эффективные напряжения  $\sigma'$ . Касательная к кругу Мора, построенному в эффективных напряжениях, будет давать эффективные параметры прочности. На рисунке 19 прямая линия (2) определяется эффективным углом внутреннего трения  $\phi'$ . Здесь подразумевается так называемый «кажущийся угол

внутреннего трения» (этот термин можно найти в книге П.Л. Иванова Грунты и основания гидротехнических сооружений 1985 года издания), соответствующий эффективным значениям прочности. Значения  $\varphi'$  могут быть высокими даже для слабых грунтов.

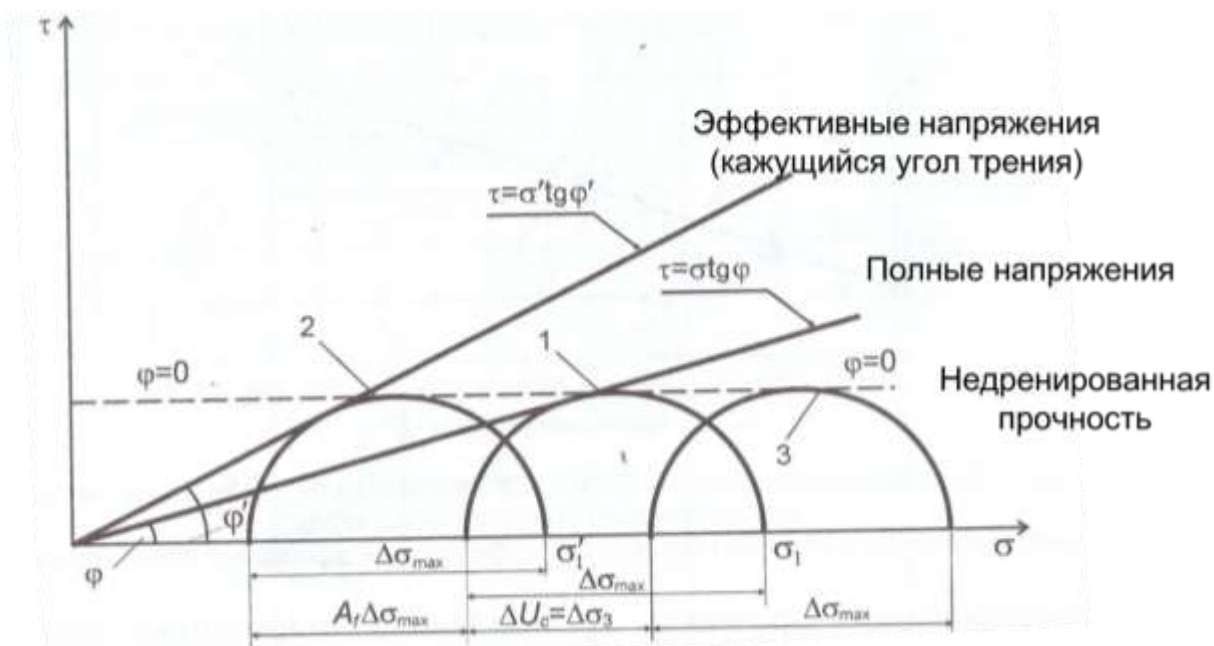


Рисунок 19 - Параметры прочности грунта в полных и эффективных напряжениях

Сравнение прочности по методу К. Терцаги и методу Н.Н. Маслова приведено в учебнике Э.М. Доброва «Механика грунтов» (рисунок 20).

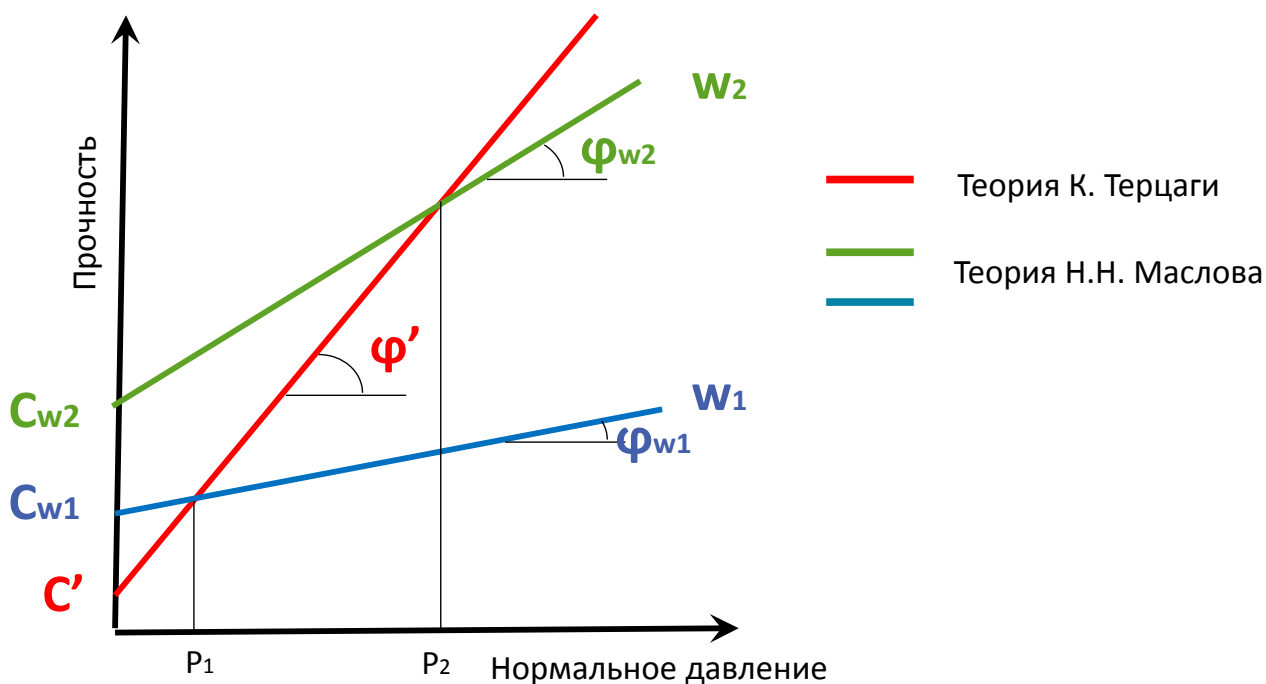


Рисунок 20 - Сравнение прочности грунта по Н.Н. Маслову и К. Терцаги

Как видно из рисунка 20, каждому значению нормального давления  $P$  соответствует одна точка на линии предельного состояния по К. Терцаги (определяется значениями  $\varphi'$  и  $c'$ ) и точка на одной из множества линий предельного состояния по Н.Н. Маслову (определяется текущим состоянием плотности-влажности и значениями  $\varphi_{wi}$  и  $c_{wi}$ ). Таким образом, очевидно, что две разные теории являются вариантами интерпретации одного и того же явления.

## 4.2 Исходные данные

Для выполнения сравнительных расчетов была задана насыпь высотой 4 м на слабом основании мощностью 4 м, подстилаемым прочными и несжимаемыми грунтами. Расчетные характеристики приняты следующими:

- грунт насыпи:  $\gamma_{нас}=18$  кН/м<sup>3</sup>, эффективные прочностные характеристики (КД)  $\varphi'=30^\circ$ ,  $c'=10$  кН/м<sup>2</sup>.

- грунт основания:  $\gamma_{гр}=17$  кН/м<sup>3</sup>, эффективные прочностные характеристики (консолидированное состояние, КД-испытания)  $\varphi'=15^\circ$ ,  $c'=12$  кН/м<sup>2</sup>.  
Недренированная прочность (естественное состояние, НН-испытания)  $c_u=16$  кН/м<sup>2</sup>.

Таблица 16 – Свойства грунта основания в зависимости от типа испытания

Параметры прочности	Характеристики грунтов, полученные при		
	НН испытаниях в стабилометре	КД испытаниях в стабилометре	быстром сдвиге
Сцепление, кПа	16 ( $c_u$ -недренированная прочность)	12	15
Угол внутреннего трения, град.	-	15	3

## 4.3 Результаты расчетов

Расчеты производились в программе «Устойчивость откоса» (GEO5) и программе Plaxis. Были выполнены четыре варианта расчетов:

1 - определение возможности быстрого возведения насыпи по заданной недренированной прочности;

2 – определение возможности быстрого возведения насыпи по заданным  $c$  и  $\varphi$  (быстрый сдвиг);

3 - определение устойчивости насыпи после консолидации (медленное возведение) по заданным  $c'$  и  $\varphi'$ ;

4 – численное моделирование (совместные расчеты устойчивости и консолидации).

### 4.3.1 Быстрое возведение с недренированной прочностью

Первоначально определяют возможность быстрого возведения насыпи, для чего в расчет принимается недренированная прочность основания  $s_u$ . Устойчивость насыпи недостаточная  $K_{уст}=0,94$  (рисунок 21).

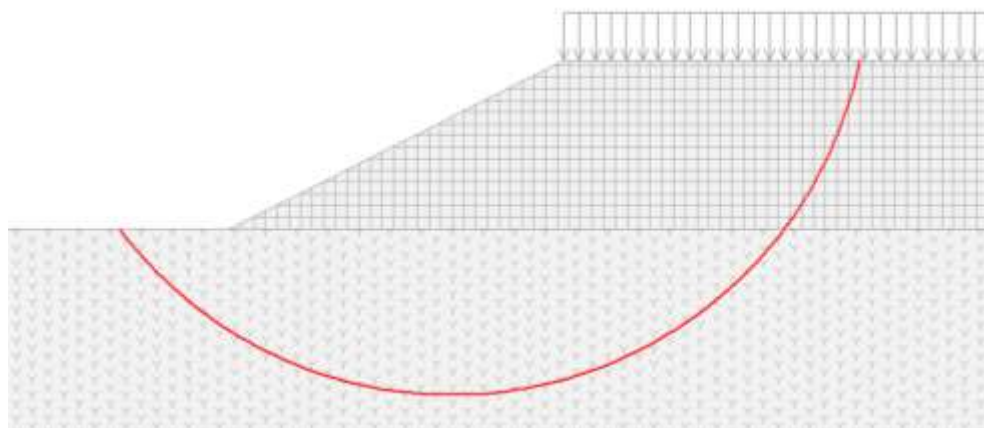


Рисунок 21 - Расчетная схема к определению устойчивости насыпи при быстром возведении

Результаты расчетов различными методами предельного равновесия сведены в таблицу 17.

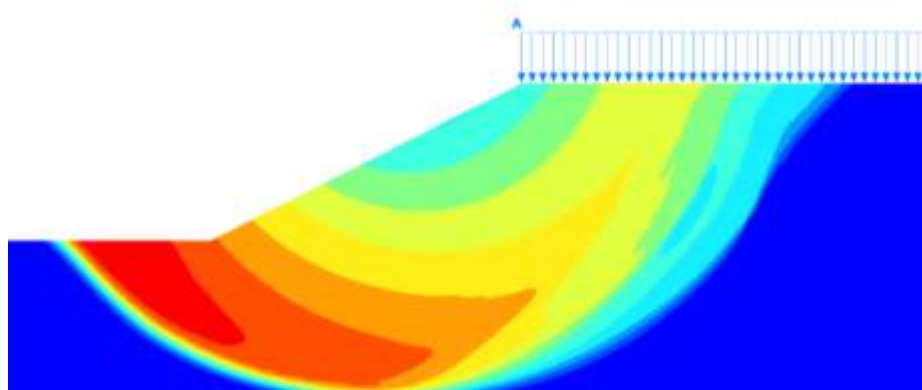
Таблица 17 - Результаты расчетов устойчивости

Метод расчета	$K_{уст}$
Сарма	1,18
Моргенштейна-Прайс	0,94
Шахунянц	0,94

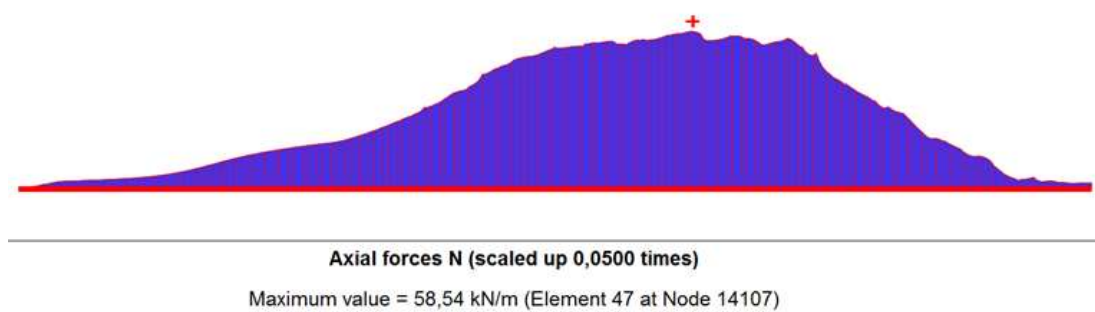
Для обеспечения требуемой устойчивости насыпи возможны различные варианты ее усиления: изменение режима возведения, армирование, бермы и пр. В качестве примера рассмотрен вариант армирования. Путем подбора определено требуемое значение прочности геосинтетического материала 140 кН/м, при котором устойчивость насыпи составляет  $K_{уст}=1,23$ . Это значение долговременной прочности, т.е. той, которая должна сохраниться до конца срока эксплуатации сооружения.

В соответствии с графиком (рисунок 14) паспортная прочность (т.е. та, которая должна быть указана в проекте) для полученного расчетного значения составит 300 кН/м. Это значение получено при расчете на 120 лет, 4-9 рН, грунт насыпи – песок.

Отдельно стоит выделить метод Сарма, по которому результаты расчетов, в данном примере, совпали с результатами расчета в Plaxis с использованием параметра недренированной прочности (рисунок 22). Методы предельного равновесия, в силу своих особенностей, могут некорректно производить расчет с недренированной прочностью. Метод Сарма (Sarma) имеет отличительную особенность - непостоянность наклона боковых граней отсеков и принцип снижения прочностных характеристик грунта. Согласно методам Сарма и SRM (Plaxis), для обеспечения требуемого  $K_{уст}=1,20$ , требуется геоматериал с меньшей прочностью (паспортная – 200кН/м)



*Рисунок 22 – Расчет устойчивости численным методом без армирования с недренированной прочностью*



*Рисунок 23 - Растягивающие усилия в геосинтетической прослойке, полученные в Plaxis*

#### **4.3.2 Быстрое возведение с прочностными характеристиками, полученными на срезном приборе**

Характеристики грунта заданы по результатам испытания при быстром сдвиге:  $\varphi' = 3,0^\circ$ ,  $c' = 15 \text{ кН/м}^2$ . Устойчивость насыпи при этих характеристиках грунта приблизительно равна полученной при расчетах с недренированной прочностью:  $K_{уст} = 1,14$ .

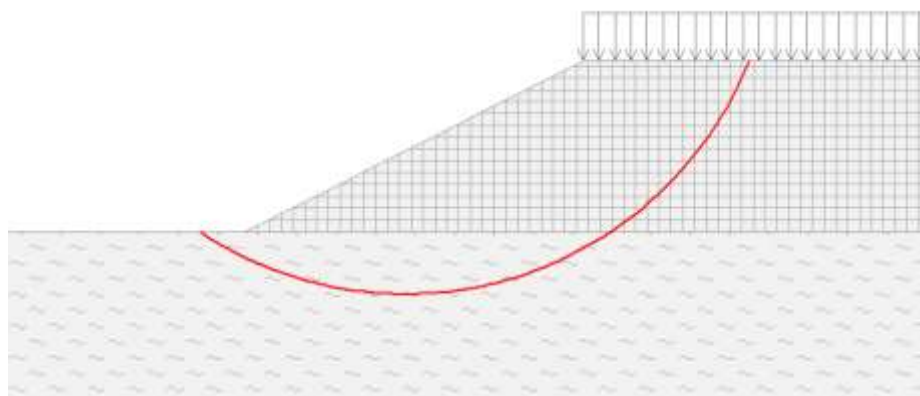
Путем подбора определено требуемое значение прочности геосинтетического

материала 50 кН/м (паспортная прочность 120 кН/м).

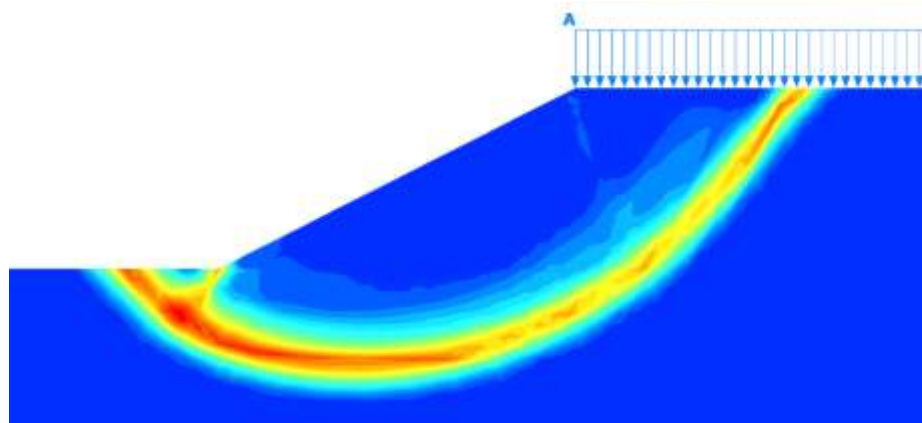
#### **4.3.3 Устойчивость насыпи после консолидации (эффективные параметры прочности)**

После отсыпки насыпи произойдет консолидация (упрочнение) основания и характеристики изменятся до эффективных значений  $\varphi' = 15^\circ$ ,  $c' = 12$  кН/м<sup>2</sup>.

По результатам расчетов как методами предельного равновесия, так и путем численного моделирования, получено, что устойчивость насыпи обеспечивается без армирования –  $K_{уст} = 1,72$  (рисунок 24).



*Рисунок 24 - Расчетная схема к определению устойчивости насыпи при медленном возведении*



*Рисунок 25 - Расчет устойчивости численным методом с использованием эффективных параметров дренированной прочности*

#### **4.3.4 Расчеты путем численного моделирования с учетом консолидации**

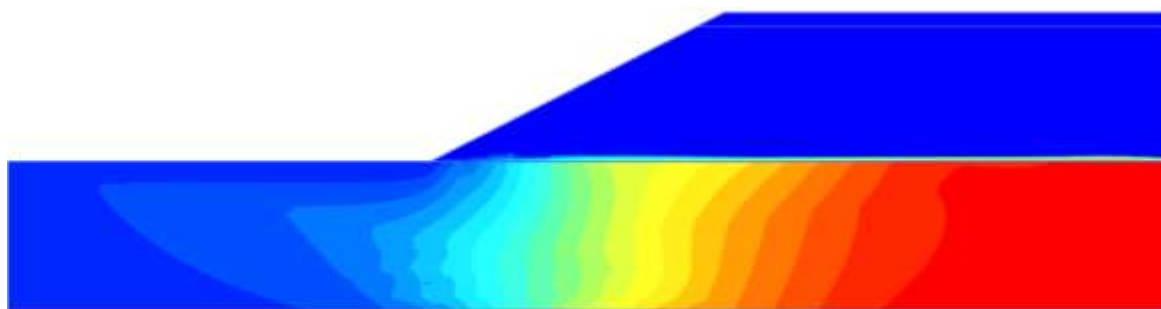
Как было указано ранее, в случае неустойчивого состояния насыпи в процессе быстрого ее возведения, требуется изменение темпов отсыпки. Насыпь отсыпается очень медленно, с интенсивностью, соответствующей ходу осадки основания, при

этом нагрузка на основание в процессе возведения постепенно нарастает. Такие расчетные условия можно назвать медленной отсыпкой.

Моделирование медленного возведения насыпи с учетом консолидации основания было выполнено в программе Plaxis. Этот тип расчета обеспечивает целостность, т.е. отсутствие искусственного деления на два состояния, что свидетельствует в пользу большей точности такого подхода.

Этапы расчета:

- 1- Отсыпка насыпи (с заданными эффективными характеристиками  $\phi'=15,0^\circ$ ,  $c'=12 \text{ кН/м}^2$ ). Расчеты с параметром Undrain A позволяют получить значение порового давления (рисунок 26) и снижение за счет него прочности (рисунок 27 вверху).

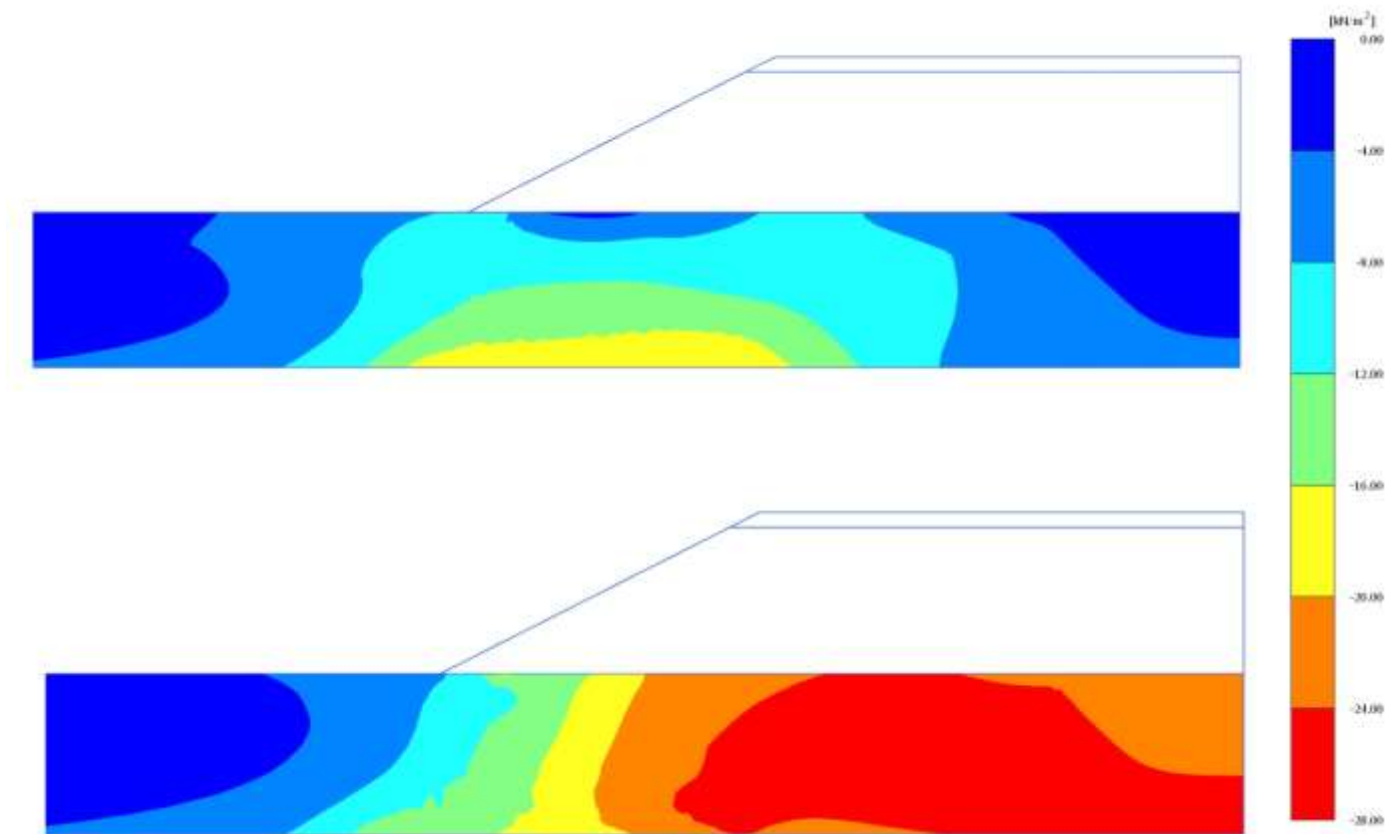


*Рисунок 26 - Изополя порового давления (макс значение 77,96 кН/м<sup>2</sup>)*

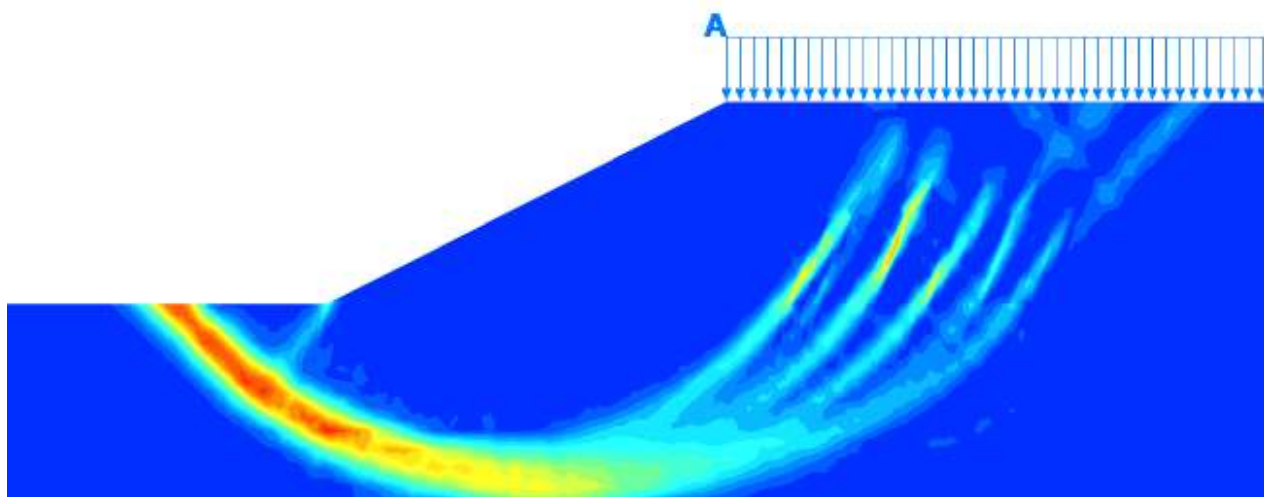
- 2- Консолидация основания ( $k_\phi = 0,0005 \text{ м/сут}$ ). Снижение порового давления и повышение прочности до заданной эффективной.
- 3- Нагружение насыпи транспортной нагрузкой.
- 4- Расчет устойчивости.

Получены следующие результаты расчетов:

- Время консолидации – 100 дней.
- Расчет до консолидации показывает коэффициент устойчивости ( $K_{уст}=1,15$ ) (рисунок 28), аналогичный полученному при расчетах с недренированной прочностью при быстром возведении (п. 4.3.1).
- Устойчивость после консолидации –  $K_{уст}=1,42$ .



*Рисунок 27 - Сдвиговая прочность в основании насыпи: сверху – до консолидации (максимальное значение 18,67 кН/м<sup>2</sup>), внизу – после консолидации (максимальное значение 26,41 кН/м<sup>2</sup>)*



*Рисунок 28 - Расчетная схема потери устойчивости насыпи при численном моделировании*



Таблица 18 – Итоги расчетов устойчивости

Метод расчета	Расчетные параметры	Варианты расчетов		
		быстрое возведение насыпи		медленное возведение насыпи
		Использование параметра недренированной прочности $c_u$ (НН испытания)	Расчет с характеристиками, полученными при быстром сдвиге	Расчет с эффективными консолидированными характеристиками (КД испытания)
Программы, реализующие методы предельного равновесия ( <i>Geo5, Slide</i> )	$K_{уст}$ без армирования	0,94 (Моргенштейна-Прайс, Бишоп)  *1,18 (Сарма)	<b>1,14</b>	<b>1,72</b>
	$K_{уст}$ с армированием	<b>1,23</b> (Моргенштейна-Прайс, Бишоп)	<b>1,22</b>	-
	Расчетная прочность геоматериала долговременная, кН/м	140	50	-
	Прочность геоматериала паспортная, кН/м	<b>300</b> *200 (Сарма)	<b>120</b>	-
Программы численного моделирования (МКЭ), реализующие метод снижения прочностных характеристик ( <i>Plaxis</i> )	$K_{уст}$ без армирования	<b>1,16</b>	<b>1,11</b>	<b>1,70</b> (расчет drain)
	$K_{уст}$ с армированием	<b>1,28</b>	<b>1,24</b>	-
	Расчетная прочность геоматериала долговременная, кН/м	50	50	-
	Прочность геоматериала паспортная, кН/м	<b>100</b>	<b>100</b>	-
Консолидационный расчет в Plaxis	<b>UndrainA с заданными эффективными КД характеристиками</b> $K_{уст}$ (без консолидации)= <b>1,15</b> $K_{уст}$ (с консолидацией) = <b>1,42</b> Время консолидации = 100 дней ( $k_f = 0,0005$ м/сут)			

#### 4.4 Выводы по расчетам устойчивости

1. Как следует из таблицы 18, коэффициенты устойчивости, полученные при расчете с недренированной прочностью (быстрая отсыпка), имеют разброс значений в зависимости от используемого метода расчета. В различных случаях этот разброс может проявляться по-разному: значения по SRM методу могут быть одинаковыми с методами предельного равновесия; метод проф. Шахунянца всегда, казалось бы,

дающий заниженные значения  $K_{уст}$  может, наоборот, дать значение, большее, чем в других методах. В целом стоит отметить, что программы расчета по МПР дают так называемые верхние границы, т.е. завышение коэффициента устойчивости. Еще одна сложность их использования заключается в оптимизации поиска наилучшего положения поверхности скольжения, поэтому опыт и интуиция расчетчика по-прежнему остаются его главным инструментом.

3. Недостатки принятых в практике методов расчета требуют особого подхода. Рекомендуется выполнять расчеты устойчивости с использованием как инженерных программ, основанных на методах предельного равновесия (GEO5 Устойчивость откоса; GGU Stability; GeoStab; GeoStudio; SlopeStability; Slide; DCGeotex; MRE; MacStars 2000, GenID32 и др.), так и программ численного моделирования, использующих метод снижения прочности (Plaxis, GEO5 МКЭ, Phase2, Midas GTS и др.) для взаимного контроля. Это связано с тем, что МПР в силу упрощений и допущений могут давать сильно отличающиеся результаты, а результаты, полученные в геотехнических комплексах использующих SRM-метод, могут быть неверными в виду сложности программ и используемых моделей грунта. О выборе метода расчета можно почитать в журнале «Транспорт Российской Федерации» №6(49) 2013 статья: «Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик» или на форуме сайта <http://miakoming.ru>.

4. Методы предельного равновесия в виду своей особенности - расчета в состоянии предельного равновесия – задействуют в расчете всю прочность геосинтетической прослойки вне зависимости от ее расположения, а метод SRM (Plaxis) в процессе расчета снижает прочность грунта и в результате стабилизации откоса задействует только требуемую прочность армирующей прослойки. Таким образом, в результате численного моделирования требуемая прочность геосинтетического материала получилась меньше ( $F_{ult}=100$  кН/м), чем при расчете по методам предельного равновесия ( $F_{ult}=300$  кН/м).

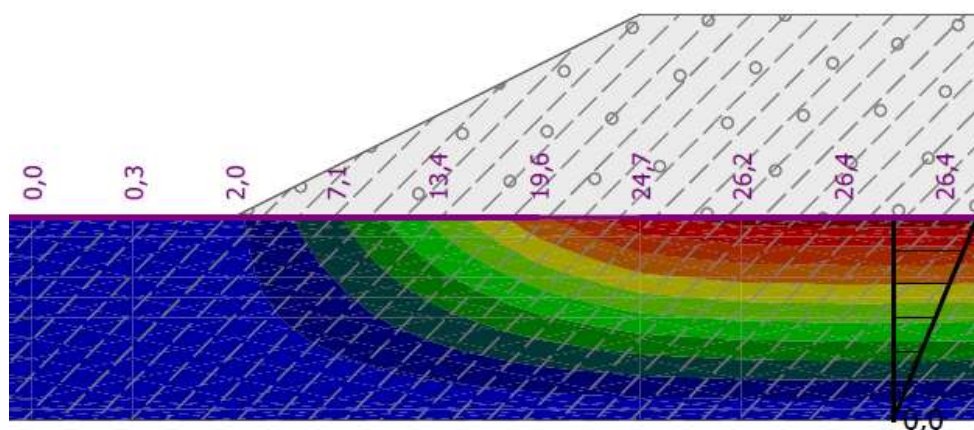
5. Наиболее достоверным и близким к действительности считается численное моделирование, в процессе которого рассчитывается осадка сооружения, изменение напряженно-деформированного состояния основания и упрочнение грунта в ходе

консолидации. Полученное в результате численного моделирования (модель грунта в Plaxis с типом поведения Undrained A) значение  $K_{уст}=1,42$  отличается от полученного при дренированном расчете (п. 4.3.3)  $K_{уст}=1,70$  (см. таблицу 18), что связано с изменением напряженно-деформированного состояния в ходе строительства и консолидации (во время проверки медленного возведения напряженно-деформированное состояние принимается исходным, т.е. не учитывает осадку и консолидацию основания).

б. В результате численного моделирования получают следующие результаты:

- конечная осадка;
- время реализации осадки (консолидация);
- устойчивость при быстром строительстве, при медленном возведении, параметры медленного возведения (время выдержки каждого слоя отсыпки), а также устойчивость в промежуточных стадиях;
- интенсивность затухания осадки (что является критерием устройства покрытия);
- величину досыпки с учетом взвешивающего действия грунтовых вод.

Для получения подобных результатов инженерными методами необходимо иметь в качестве исходных данных кривые зависимости прочности от влажности (рисунок 18) и выполнять несколько расчетов в разных программах. Для определения времени перехода от недренированной прочности к эффективным значениям в программах, не использующих МКЭ, необходимо выполнить расчеты консолидации. Например, в программе Осадка (Geo5) время консолидации составило 100 дней (рисунок 29). В данном случае имеется в виду полная консолидация (степень консолидации 100%).



**Рисунок 29 – Результаты расчетов осадки и времени консолидации в программе «Осадка»**

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМИРОВАННОГО ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА

При выполнении расчетов устойчивости по результатам получают значение коэффициента устойчивости в зависимости от прочностных характеристик грунтов. Это значение необходимо сравнить с нормированным коэффициентом запаса, задаваемым из условий обеспечения надежности с учетом эксплуатационных опасностей и рисков. В общем случае значение коэффициента запаса составляет  $K_{\text{зап}}=1,1\div 1,25$  для основного сочетания нагрузок и  $K_{\text{зап}}=1,05\div 1,20$  для особого. Принимаемая величина назначается, в общем случае, на основании точности исходных данных, категории транспортного объекта и с учетом погрешности применяемых методов расчета [Маций С.И. Противооползневая защита: монография. – Краснодар: АлВи-дизайн, 2010.-288 с.].

В общем виде формула для расчета коэффициента запаса выглядит следующим образом:

$$K_{\text{зап}} = \frac{K_n n_c n_0}{m_0}, \quad (9)$$

где  $K_n$  – коэффициент надежности по назначению сооружения;  $n_c$  – коэффициент сочетания нагрузок;  $n_0$  – коэффициент перегрузки;  $m_0$  – коэффициент условий работы. В таблице 19 приведены значения составляющих формулы (9), взятые из различных источников (символьные обозначения оригиналов сохранены).

Отдельно стоит упомянуть требования в железнодорожной отрасли. В регламентирующем расчеты документе СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм» приводится схожая с (9) формула, но несколько отличающиеся значения входящих в нее коэффициентов.

Коэффициент сочетания нагрузок приводится для основного сочетания, для особого (сейсмичность территории) и строительного, что в целом не противоречит приведенным ранее значениям. А вот коэффициент условий работы может принимать два значения:

- $\gamma_c=1$  – для методов удовлетворяющих условиям равновесия;
- $\gamma_c=0,95$  – для упрощенных методов расчета.

Очевидно, что в сравнении со свежим документом ОДМ 218.2.006-2010 требования СП 32-104-98 сильно устарели. Во-первых, неясно, что подразумевается под понятием «методы, удовлетворяющие условиям равновесия»: имеются в виду условия равновесия моментов или сил? Во-вторых, нет разъяснения, что такое «упрощенные методы» - рекомендуемый СП метод Шахунянца можно отнести к упрощенным.

В целом можно констатировать необходимость пересмотра действующих норм по назначению требуемого коэффициента запаса. В основном это касается четкого разъяснения, в каком случае какие коэффициенты следует принимать, потому что на сегодняшний день нормируемый коэффициент запаса можно вполне законно (опираясь на разные действующие источники) назначить существенно разным.

Таблица 19 – Значения коэффициентов для определения нормируемого коэффициента устойчивости из различных источников

Источник	Коэффициент надежности	Коэффициент условий работы	Коэффициент сочетаний нагрузок	Коэффициент перегрузки
ОДМ 218.2.006-2010	для III класса капитальности защищаемых сооружений: - при основном сочетании нагрузок $\gamma_n=1,20$ ; - при особом сочетании $\gamma_n=1,1$	$\gamma_c=1$ (принято по примеру, в тексте пояснения не приводятся)	Коэффициент учета расчетного периода: эксплуатационный $\Psi=1$ ; строительный $\Psi=0,95$	
Л.И. Семендяев «Методика расчета насыпей, армированных различными материалами»	для дорог I категории $K_n = 1,25$ , для II кат. $K_n = 1,2$ , для III кат. $K_n = 1,15$ , для IV кат. $K_n = 1,1$	$M_o = 0,9$ для пылевато-глинистых грунтов в стабилизированном состоянии (выемки) и $M_o = 0,85$ - в нестабилизированном состоянии	$N_c = 1 - 0,9$	$N_o = 1,2$ для насыпей
«Методические рекомендации по разработке выемок в глинистых грунтах влажностью выше оптимальной...»	для дорог для I кат. $K_n = 1,25$ , для II кат. $K_n = 1,2$ , для III кат. $K_n = 1,1$	То же	То же	$n_o = 1,1$ для выемок; $n_o = 1,2$ для насыпей
СНиП 2.02.01-83	для сооружений I класса $K_n = 1,20$ , для II класса $K_n = 1,15$ , для III класса $K_n = 1,1$	для песков, кроме пылеватых $\gamma_c = 1,0$ ; для песков пылеватых, а также пылевато-глинистых грунтов в стабилизированном состоянии $\gamma_c = 0,9$ ; для пылевато-глинистых грунтов в нестабилизированном состоянии $\gamma_c = 0,85$ ; для скальных грунтов: -невыветрелых и слабыветрелых $\gamma_c = 1,0$ ; -выветрелых $\gamma_c = 0,9$ ; -сильновыветрелых $\gamma_c = 0,8$	-	-

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проектирования транспортных сооружений с геосинтетическими армирующими прослойками необходимо обеспечивать безопасность и надежность работы сооружения. Для этих целей производятся расчеты по оценке и прогнозу поведения сооружения с использованием соответствующих коэффициентов запаса. В практике проектирования так сложилось, что зарубежные производители навязали мнение, что коэффициенты для определения длительной прочности настолько важны, что отличия в сотые или десятые долей значения являются существенными. В нашей стране нет утвержденного нормативного документа, который бы являлся общепризнанным среди специалистов, поэтому всякие сравнения коэффициентов, полученных в разных зарубежных исследовательских лабораториях, по существу не имеют той значимости, которую им приписывают. Учитывая, что реальный опыт проверки методики определения запаса по прочности геосинтетических материалов насчитывает не более 50 лет, такая «точность» в определении коэффициентов и вовсе не обязательна. Таким образом, сравнение коэффициентов (а они определяют длительную прочность геоматериала), полученных в зарубежных лабораториях, с российскими некорректно в виду значительных отличий методов испытаний. А вот методика определения расчетного значения растягивающих усилий в армирующей прослойке требует серьезного изучения и развития. Ведь зачастую споры о выборе того или иного материала, аргументированные «высокоточными» коэффициентами, не имеют под собой никакой основы, поскольку отсутствует собственно расчет и расчетное растягивающее усилие.

Представленная информация является кратким изложением курса лекций по геотехнике и геосинтетическим материалам, направленным на формирование представления о современных подходах к расчетам и применению численного моделирования.

Надеемся, что изложенный в брошюре материал позволит систематизировать знания и на основе примера расчета получить более полное представление о процедуре обоснования выбора геосинтетического материала в конструкции усиления земляного полотна.