

Вязкоупругие свойства геосинтетических материалов

А.А. Алексеев ^{1*}, И.А. Коваленко ², О.Н. Столяров ³, Б.Е. Мельников ⁴

¹⁻⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	История	Ключевые слова
УДК 691.3 doi: 10.18720/CUBS.56.2	Подана в редакцию 16.01.2017	Геосинтетические материалы; вязкоупругие свойства; ползучесть; релаксация напряжения; температурно-временная аналогия; метод ступенчатых изотерм;

АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день геосинтетические материалы находят все новые области применения в строительстве. Вместе с тем актуальной стоит задача по оценке и прогнозированию их механических свойств на длительные времена. Принимая во внимание вязкоупругую природу синтетических полимеров, из которых изготавливаются подавляющее число геосинтетических материалов, в данной статье рассматриваются варианты определения и прогнозирования их вязкоупругих свойств. Проведенный анализ показывает преимущества и недостатки различных методов исследования ползучести геосинтетических материалов, включая прямые измерения, температурно-временную аналогию полимеров (ТВА) и метод ступенчатых изотерм (МСИ).

Содержание

1.	Введение	18
2.	Методы	18
3.	Результаты и обсуждения	20
3.	Заключение	23
4.	Благодарности	23

Контакты авторов:

- 1 * +7(999)2397154, nikolas.alexeeff@yandex.ru (Алексеев Николай Николаевич, студент)
 2 +7(906)2625247, ilyako27@mail.ru (Коваленко Илья Александрович, студент)
 3 +7(812)5526303, oleg.stolyarov@rambler.ru (Столяров Олег Николаевич, к.т.н., доцент)
 4 +7(812)5526303, kafedra@ksm.spbstu.ru (Мельников Борис Евгеньевич, д.т.н., профессор)

1. Введение

На сегодняшний день геосинтетические материалы находят широкое применение практически во всех областях строительства [1, 2]. По своему строению геосинтетические материалы представляют собой плоские или пространственные гибкие полотна, решетки и сетки различной формы. Геосинтетические материалы используются в различных функциях, таких как армирование, разделение, фильтрация, защита и др. [2]. Среди всех функций - особый интерес представляет армирование, в которой геосинтетические материалы выполняют первостепенную несущую функцию [3-22, 24, 25]. В областях применения, связанных с армированием, особое внимание уделяется использованию армирующим геосинтетических материалам, таким как высокопрочные геотекстильные полотна и георешетки [10, 26-33]. Данные материалы нашли широкое применение при армировании подпорных стенок [34-39], усилении откосов [18, 20, 40, 41], оснований дорожных одежд [3, 4, 42, 43] и в других областях применения [44-46].

Для обеспечения надежного выполнения геосинтетическими материалами требуемых функций они должны обладать высокими механическими характеристиками [1, 2, 47, 48]. В то же самое время при выполнении прочностных расчетов принято считать, что механические свойства конструкционных материалов, как правило, не зависят от фактора времени, т. е. сохраняют свою прочность и жесткость постоянной в течение длительного времени. Действительно, традиционные строительные материалы, например, такие как металлы, обладают постоянством механических свойств. То есть сохраняют свою прочность и жесткость постоянной на протяжении длительного времени. Однако наряду с высокими прочностными свойствами геосинтетические материалы обладают вязкоупругостью, которая по сути является существенным недостатком в таких применениях. Материалы, которые сочетают в себе свойства вязкости и упругости, называются вязкоупругими. В вязкоупругих материалах напряжение является не только функцией деформации, но также и функцией времени:

$$\sigma = f(\varepsilon, t) \quad (1)$$

В отличие от металлов геосинтетические материалы изготавливаются, как правило, из синтетических полимеров и, как следствие, обладают ярко выраженными вязкоупругими свойствами [2, 47, 49]. Последние оказывают негативное влияние на долговременную прочность геосинтетических материалов. Это влияние заключается в непостоянстве механических свойств (усилия или деформации) во времени. Вследствие чего необходимо учитывать данный фактор при определении долговременной прочности и расчетного срока службы геосинтетических материалов. Актуальность исследования вязкоупругого поведения геосинтетических материалов обусловлена необходимостью определения их расчетного срока службы, допускаемых нагрузок в различных конструкциях. Так, при определении долговременной прочности геосинтетических материалов, наряду с коэффициентом запаса также применяются дополнительные понижающие коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов. Среди всех понижающих коэффициентов наиболее выделяется коэффициент, учитывающий снижения прочности материала из-за ползучести [52].

2. Методы

Методы определения вязкоупругих свойств геосинтетических материалов можно условно разделить на два типа в зависимости от характера нагружения [2]. К первому типу относится ползучесть, т.е. приложение постоянного заданного усилия и измерение результатов изменения деформации с течением времени. Схематично данный процесс представлен на Рис. 1а. На первом этапе под действием постоянно приложенной нагрузки происходит медленное постепенно увеличение деформации во времени. Данное явление присуще большому числу конструкционных материалов. Затем при снятии нагрузки происходит восстановительный деформационный процесс. Скорость ползучести и уровень восстановления зависят от величины приложенной нагрузки и времени ее действия. На практике многие материалы находятся под действием постоянной приложенной нагрузки и во время изготовления или эксплуатации испытывают непрерывное действие растягивающей или сжимающей нагрузки. К таким материалам относятся: различные тросы, канаты, испытывающие деформацию растяжения под действием веса приложенного груза; пластмассы и изделия из них; бетонные конструкции под действием длительной статической деформации. Также подавляющее большинство армирующих геосинтетических материалов работает на ползучесть. Ко второму виду испытаний относится релаксация и обратная релаксация напряжения [53]. Данный процесс схематично представлен на Рис. 1б. В данном виде испытаний задается постоянная деформация. В результате чего происходит постепенное снижение напряжения (усилия) в материале с течением времени. Затем на втором этапе при частичной разгрузке

(например, при $n=0,4\div 0,6$) происходит процесс обратной релаксации, заключающийся в некотором увеличении напряжения. Релаксацию напряжения или усилия испытывают многие материалы, как в процессе изготовления, так и эксплуатации. К таким материалам относятся: резиновые уплотнительные кольца, хомуты, бандажи; тенты и легковесные строительные конструкции. В областях применения геосинтетических материалов такой процесс на практике встречается гораздо реже, чем ползучесть. Хотя, например, установленные с определенным натяжением геомембраны и другие элементы конструкций из геосинтетических материалов, где технологически при монтаже происходит задание определенной деформации в виде изменения начальных размеров материала [53,54].

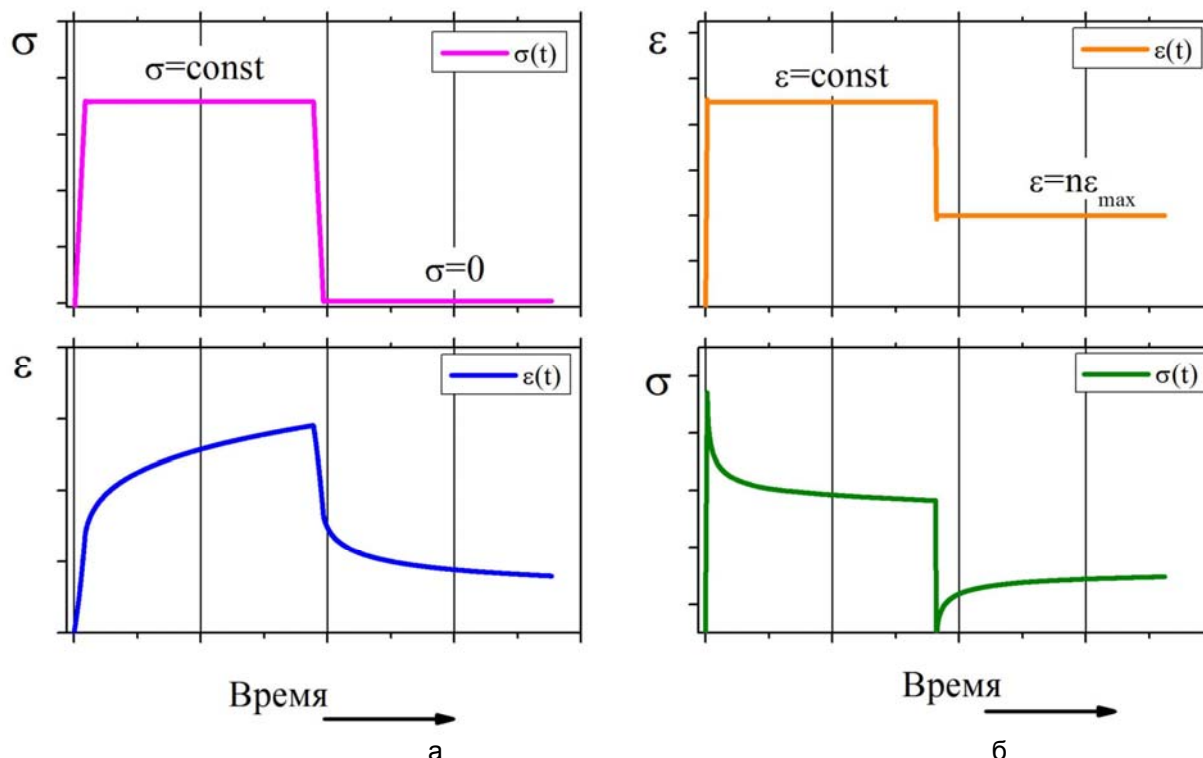


Рисунок 1. Ползучесть с восстановительным деформационным процессом (а) и релаксация напряжения с последующим восстановительным процессом (б).

Методы исследования ползучести геосинтетических материалов можно условно разделить на две группы. К первой группе следует отнести определение ползучести прямыми измерениями. Вторая группа включает в себя ускоренные методы испытаний. Преимущество прямого измерения ползучести состоит в объективности получаемых данных и отсутствии влияния каких-либо факторов, связанных с проведением испытаний. Недостатком первой группы является продолжительность испытаний, которая может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. Так, минимальное время испытания образцов геосинтетических материалов на ползучесть составляет 1000 ч [1, 24]. Однако, как правило, данные таких измерений можно экстраполировать не более чем на один порядок. Принимая во внимание продолжительность работы строительных конструкций с применением геосинтетических материалов, составляющий порой срок службы до нескольких десятков лет, необходимо проводить более длительные испытания на ползучесть, которые порой могут продолжаться до нескольких лет. Это вовлекает немалые временные и материальные ресурсы. Не смотря на относительную простоту и дешевизну испытательных установок, следует отметить, что их количество и занимаемая площадь в лаборатории, также как и время испытаний могут существенно сказываться на стоимости таких испытаний. Преимущество второй группы – ускоренных испытаний является их кратковременность. Ускорение деформации образцов геосинтетических материалов основано на свойствах полимеров под действием температуры увеличивает скорость ползучести, что позволяет существенно увеличить деформацию исследуемых образцов в течение короткого промежутка времени. Недостатки такого метода состоят во влиянии фактора температуры.

3. Результаты и обсуждения

3.1. Прямые измерения ползучести

На сегодняшний день накоплено немало сведений о ползучести геосинтетических материалов. В работах [21,34,40,41,58,63-67] проводились прямые измерения ползучести, которые охватывали широкий диапазон исследуемых геосинтетических материалов в основном применяемых для армирующих функций (геотекстиль и георешетки). Продолжительность испытаний в данных работах также существенно различалась. Например, в [61] было исследовано вязкоупругие свойства трех типов полимерных георешеток продолжительностью 30 дней на уровне нагрузки около половины своей номинальной прочности на разрыв с последующим измерением прочности на разрыв. В то же время в [22] пять различных типов полиэфирных георешеток с номинальной прочностью при растяжении от 100 до 400 кН/м были испытаны для оценки долговременной деформации ползучести этих георешеток в течение 10 000 ч. Чтобы сократить время подобных экспериментов в работе [57] был предложен подход, позволяющий на основе кратковременных испытаний оценить вязкоупругие свойства геосинтетических материалов. В основу данного подхода положен метод кратковременного измерения ползучести и релаксации напряжения в течение 100 мин и последующей оценке целесообразности проведения длительных испытаний на основе полученных кратковременных характеристик. Данный метод позволяет существенно сократить затраты на испытания за счет оптимизации отбора перспективных для применения образцов.

Среди недостатков прямых измерений ползучести можно отметить тот факт, что образцы геосинтетических материалов испытываются в свободном виде. Хотя на практике они находятся в непосредственном контакте с грунтом, который может также оказывать существенное влияние на ползучесть геосинтетического материала из-за различных факторов, например, давление слоев вышележащего грунта. Для учета этого обстоятельства в работе [58] рассматривается влияние грунта на ползучесть геотекстильного материала. Два образца нетканого полипропиленового геотекстильного материала укладывались на разных глубинах в пределах 3 м высоты уплотненного песка. Образцы нагружались с постоянной растягивающей нагрузкой в течение периода 1000 часов. В результате было произведено сравнение поведения ползучести в данной области по сравнению с результатами, полученными другими авторами. Результаты показали, что при таком способе испытания снижаются начальная и конечная деформации ползучести. Хотя по сравнению с другими работами было обнаружено, что скорость ползучести увеличивается по сравнению с испытаниями образцов в свободном состоянии.

3.2. Ускоренные испытания на ползучесть

Как было отмечено выше наибольший интерес при определении вязкоупругих свойств представляют собой ускоренные методы испытаний, где основным фактором, способствующим быстрому росту деформаций образцов является температура. Под воздействием повышенных температур полимерные синтетические материалы проявляют ускоренную ползучесть. Использование ускоренных методов испытаний уменьшает время, требуемое для проявления ползучести и получения соответствующих данных. Данные методы испытаний могут использоваться для прогнозирования ползучести на длительные времена. В последние два десятилетия эти методы нашли широкое распространение при оценке вязкоупругих свойств геосинтетических материалов. Следует отметить, что вязкоупругие свойства синтетических полимеров определяются температурой стеклования. Полиолефины (полипропилен и полиэтилен) обладают низким сопротивлением ползучести из-за того что рабочая температура выше их температуры стеклования, которая равна -10°C и -70°C для полипропилена и полиэтилена соответственно. Поэтому эти материалы, как правило, используются для неармирующих применений. Армирующую функцию выполняют синтетические полимеры, такие как полиэфирные волокна, поливинилспиртовые волокна и полиамидные волокна, имеющие температуру стеклования 75°C , 100°C и 50°C соответственно. Измерения должны проводиться ниже этих температур.

3.3. Метод температурно-временной аналогии

Метод температурного ускорения ползучести основан на принципе температурно-временной суперпозиции и может быть использован для анализа и прогнозирования ползучести. Сущность метода заключается в измерении ползучести полимерного материала при одном уровне заданной растягивающей нагрузки, но при различных температурах для получения единой обобщенной кривой. В данном методе проводят испытание при заданном уровне растягивающей нагрузке в течение определенного времени t . При проведении испытаний образец закрепляется в зажимах внутри камеры искусственного климата. За начальную температуру выбирается комнатная температура. Затем выполняются отдельные испытания при том же самом уровне растягивающей нагрузки и при различных температурах с интервалом, не превышающем температуру стеклования полимера из которого изготовлен геосинтетический материал. При анализе результатов измерений кривые ползучести одного вида образца для разных температур

строятся на одном графике в полулогарифмической шкале (Рис. 2а). Кривая ползучести, полученная при самой низкой температуре эксперимента, берется в качестве исходной. Кривые ползучести, полученные при более высоких температурах, сдвигаются вдоль оси времени, пока они не совпадут, частично перекрывая друг друга. Полученная обобщенная кривая является прогнозируемой долгосрочной кривой ползучести при нормальной температуре (Рис. 2б).

Коэффициент смещения, т.е. величина (в единицах, эквивалентных $\log t$), на которую каждая кривая смещена, должен быть построен на графике с температурой и образовывать прямую линию, проходящую через 0 при исходной температуре (Рис. 3).

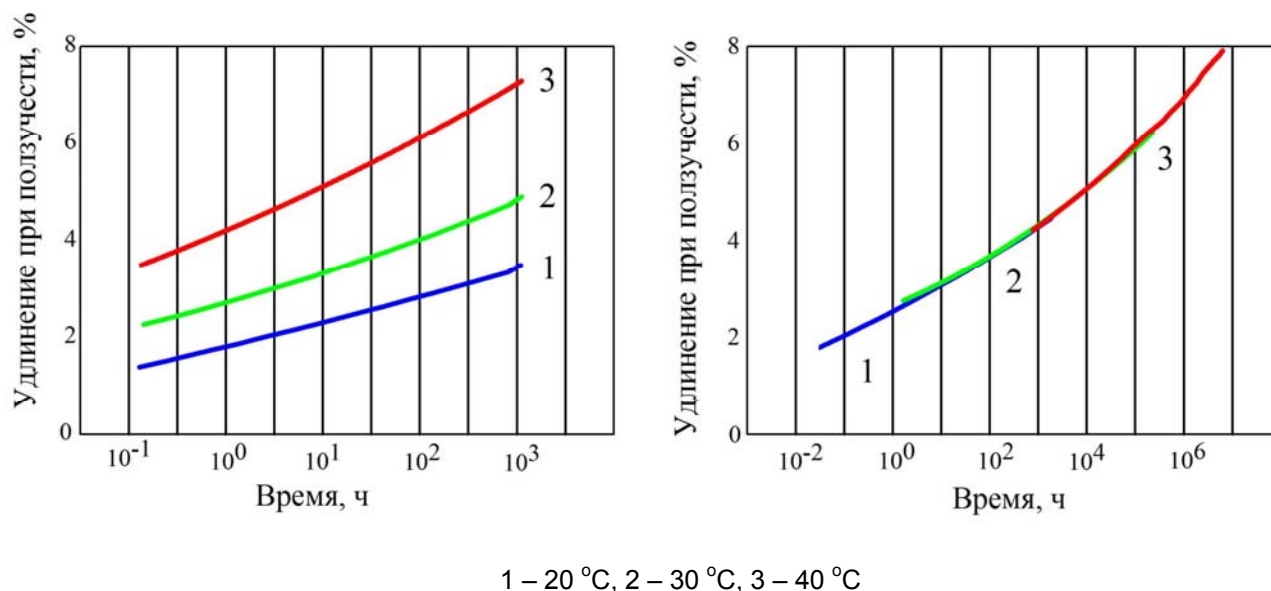


Рисунок 2. Метод температурно-временной аналогии

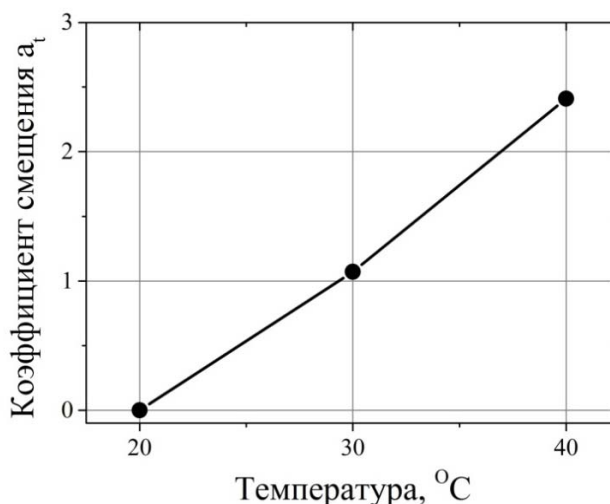


Рисунок 3. Коэффициент смещения

Метод температурно-временной аналогии применен при исследованиях широкого круга геосинтетических материалов [22, 59, 60, 68-84]. В работе [69] проведены ускоренные испытания ползучести полиэфирных георешеток двух различных типов 75, 80 и 85 °С при нагрузках в диапазоне от 30 до 50% от прочности образцов. Показано, что применения данного метода может быть весьма эффективным. В работах [59, 60] детально исследованы характеристики ползучести георешеток, являющимися одними из наиболее важных факторов, влияющих на армирование грунтовых сооружений. В этих работах, температурно-временной принцип суперпозиции используется для ускорения ползучести георешеток, а также для сокращения времени испытаний. Также описывается новое устройство для выполнения ускоренных испытаний ползучести на полиэтиленовых георешетках. Разработанное оборудование для проведения испытаний ползучести георешеток позволяет проводить испытания при

различных нагрузках и температурах одновременно. Результаты показывают, что влияние нагрузки на ползучесть георешеток является весьма значительным. Также отмечается, что влияние нагрузки слабее, чем влияние температурного фактора. Оба этих фактора должны учитываться при испытаниях георешеток на ползучесть. В работе [70] были проведены испытания ползучести полимерных георешёток при различных уровнях нагрузки и при температурах в 40 и 60°C. Экспериментальные результаты показали, что температура оказывает существенное влияние на поведение ползучести георешеток, в то время как георешетка также показывает значительную зависимость от уровня приложенной нагрузки. Определённая деформация ползучести в течение первого часа была больше общей деформации ползучести примерно на 80%.

3.4. Метод ступенчатых изотерм

Метод ступенчатых изотерм основан на испытании одиночного образца. При этом температура пошагово увеличивается для ускорения ползучести материала. Устанавливается необходимая нагрузка, рассчитанная в процентах от прочности при растяжении. Образец выдерживается при начальной установленной температуре в течение установленного периода времени t . Затем температура увеличивается на одну ступень и образец выдерживается при второй температуре в течение установленного периода времени t . Шаг температуры составляет 7-14 градусов. Далее описанные ступени измерений повторяются определенное количество раз, которое зависит от величины необходимого прогнозирования ползучести материала для определения расчетного срока службы. Кривые ползучести для разных температур строятся на одном графике (Рис. 4а). По горизонтали откладывают время, а по вертикали - относительное удлинение образцов или модуль ползучести (релаксирующий модуль) E при различных температурах.

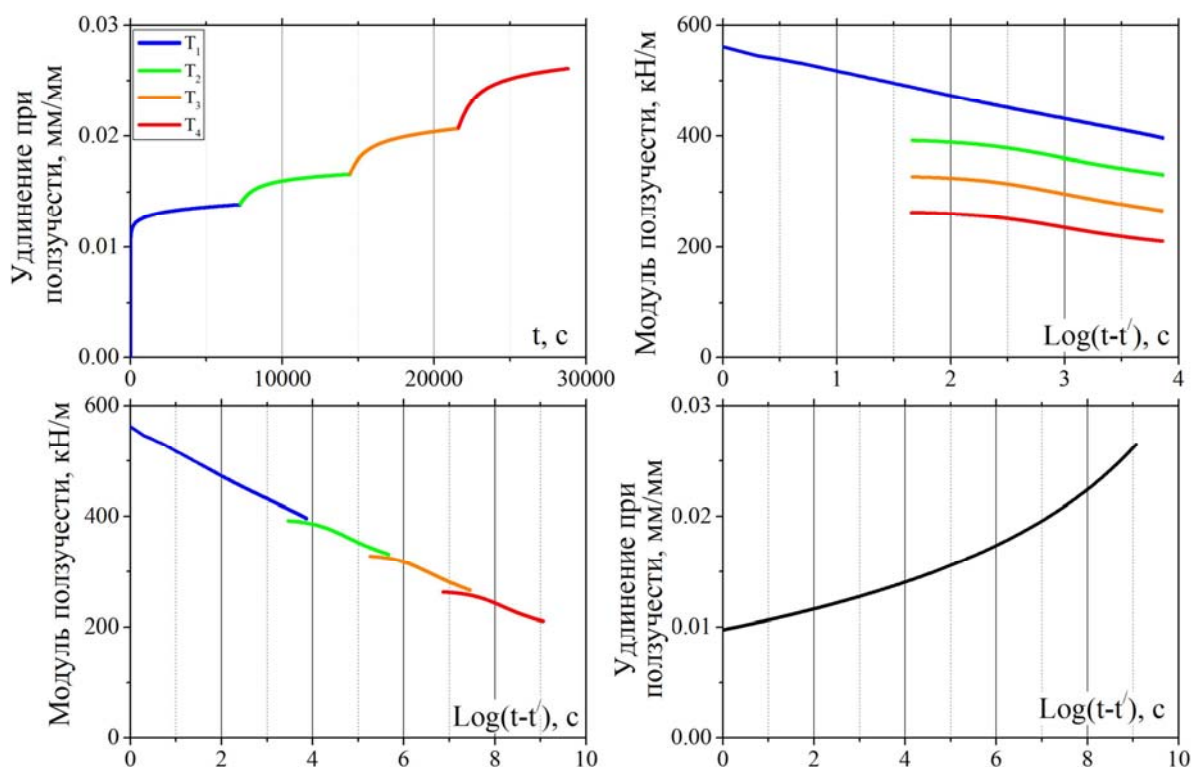


Рисунок 4. Метод ступенчатых изотерм

Модули ползучести для разных температур строятся на одном графике в полулогарифмической шкале (Рис. 4б). Кривые модуля ползучести, полученные при разных температурах, смещаются вдоль оси времени, пока они не совпадут, частично перекрывая друг друга (Рис.4в). Обобщенная кривая модуля ползучести обратно перестраивается в кривую ползучести. Полученная обобщенная кривая является прогнозируемой долгосрочной кривой ползучести для нормальной температуры (Рис.4г). Данная кривая затем используется для прогнозирования длительной деформации ползучести.

Также как предыдущий метод температурно-временной аналогии метод ступенчатых изотерм также нашел широкое применение при оценке ползучести геосинтетических материалов [22, 50, 63, 67, 68,

71-90]. Так в работе [68] наряду с температурно-временной аналогией рассмотрен метод ступенчатых изотерм. Сравнение показало, что ТВА является хорошо принятым методом ускорения для оценки вязкоупругого поведения полимерных материалов, в то время как МСИ был разработан в течение последних десяти лет в основном, чтобы сократить время испытания и использовать одиночный образец для испытания. Применимость МСИ хорошо подходит, в частности, для полиэфирных георешеток. Тем не менее, для полиэтиленовых георешеток, применимость МСИ не была установлена. Для процедуры МСИ, были исследованы четыре параметра испытания. Результаты исследования подтвердили, что рекомендуемые параметры испытания: шаг в 7 °С и времени выдержки в 10 000 с подходят для полиэфирных георешеток. В работе [61] были исследованы вязкоупругие свойства трех типов полимерных георешеток. Результаты испытаний показали, что в МСИ минимум от 6 до 8 шагов следует использовать для того, чтобы прогнозировать поведение ползучести за пределами 75-летнего проектного срока службы. МСИ испытания продемонстрировали хорошее совпадение с результатами, полученными из долгосрочных испытаний на ползучесть для тканой георешетки. В [73] ползучесть георешеток измеряли с помощью 3-х методов. Все три метода показали схожие результаты, но при использовании МСИ были обнаружены большие деформации при более высоких температурах. Определенные понижающие коэффициенты для длительной прочности и ограниченной деформациями были схожи во всех методах. В работе [78] были проведены испытания ползучести георешеток из полиэтилентерефталата и полиэтилена высокой плотности с помощью пяти методов испытаний: краткосрочный и долгосрочный изотермический метод, краткосрочная и долгосрочная температурно-временная аналогия и обычный способ прямых измерений. Результаты испытаний показывают, что при том же процентном соотношении предела прочности на растяжение, полиэфирные георешетки имеют меньше деформации ползучести, чем полиэтиленовые георешетки. Кроме того, было обнаружено, что скорость деформации на первичной стадии ползучести не зависит от приложенных нагрузок для полиэфирной георешетки, в то время как скорость ползучести полиэтиленовой георешетки существенно выросла.

3. Заключение

В данной работе проведен сравнительный анализ методов испытаний на ползучесть геосинтетических материалов. Рассмотрены три основных метода измерения: прямые измерения ползучести, температурно-временная аналогия полимеров и метод ступенчатых изотерм. Преимуществом прямого измерения ползучести являются непосредственные измерения без влияния каких-либо факторов. К недостаткам следует отнести продолжительное время испытаний (до 1000 ч и до 10000 ч для вновь вводимых материалов), а также стоимость проведения испытаний. При использовании ускоренных методов испытаний основным достоинством является малое время испытания. Однако для проведения таких испытаний требуется специальное оборудование, оснащенное термокамерами.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00845а.

Литература

- [1] Sarsby R. W. (2012). Geosynthetics in Civil Engineering. Woodhead Publishing Ltd. 2007. pp. 295.
- [2] Koerner R. M. (2012). Designing With Geosynthetics, 6th Ed. Xlibris Publ. Co. 2012. 914 pages in two volumes.
- [3] Mounes S.M., Karim M.R., Khodaii A., Almasi M.H. (2016). Evaluation of permanent deformation of geogrid reinforced asphalt concrete using dynamic creep test. Geotextiles and Geomembranes. 2016. No. 44(1). pp. 109-116.
- [4] Brown S.F., Brodrick B.V. (1981) The Nottingham pavement test facility. Transportation Research Record. 1981. No. 810. pp. 67-72.
- [5] Sandroni S.S., Gomes R.C., Vilar O.M. (2010). Brazilian research and practice with geosynthetics. 9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World. 2010, pp. 3-41.
- [6] Hufenus R., Rügger R., Flum D., Sterba I.J. (2005). Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. Geotextiles and Geomembranes. 2005. No. 23(5). pp. 401-424.
- [7] Kaliakin V.N., Dechasakulsom M. (2002). Development of a general time-dependent model for geogrids. Geosynthetics International. 2002. No. 9(4). pp. 319-342.

- [8] Allen T.M., Bathurst R.J. (2002). Soil reinforcement loads in geosynthetic walls at working stress conditions. *Geosynthetics International*. 2002. No. 9 (5-6). pp. 525-566.
- [9] Christopher B.R., Holtz R.D., Berg R.R. (2001). Geosynthetic reinforced embankments on soft foundations. *Geotechnical Special Publication*. 2001. No. 122. pp. 206-236.
- [10] Fourie A.B., Fabian K.J. (1987). Laboratory determination of clay-geotextile interaction. *Geotextiles and Geomembranes*. 1987. No. 6 (4). pp. 275-294.
- [11] Richard A. (1985). Material properties for the design of geotextile reinforced slopes. *Geotextiles and Geomembranes*. 1985. No. 2 (2). pp. 83-109.
- [12] Canestrari F., Ferrotti G., Abuaddous M., Pasquini E. (2012). Geocomposite-reinforcement of polymer-modified asphalt systems. *RILEM Bookseries*. 2012. No. 11. pp. 383-395.
- [13] Leshchinsky B., Evans T.M., Vesper J. (2016). Microgrid inclusions to increase the strength and stiffness of sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. No. 44 (2). pp. 170-177.
- [14] Yang B.-H., Lai J., Lin J.-H., Tsai P.H. (2016). Simulating the loading behavior of reinforced strip footings with a double-yield soil model. *International Journal of Geomechanics*. 2016. No. 16(1).
- [15] Mosallanezhad M., Hataf N., Taghavi S.H. (2016). Experimental and large-scale field tests of grid-anchor system performance in increasing the ultimate bearing capacity of granular soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016. No. 53(7). pp. 1047-1058.
- [16] Singh A., Phanikumar B.R., Prasad R. (2016). Effect of geogrid reinforcement on load carrying capacity of a coarse sand bed. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2016. No. 7(3). pp. 1-6.
- [17] Samal M.R., Saran S., Kumar A., Mukerjee S. (2016). Dynamic behavior of geogrid reinforced pond ash. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. No. 10(2). pp. 114-122.
- [18] AlKayyal H., Althoff S., Tamaskovics N., Klapperich, H., Awwad T. (2014). Supporting structures reinforced by geogrids - The engineering challenge. 10th International Conference on Geosynthetics. 2014.
- [19] Chen Q., Farsakh M.A. (2012). Structural contribution of geogrid reinforcement in pavement. *Geotechnical Special Publication*. 2012. No. (225 GSP). pp. 1468-1475.
- [20] Ooi T.A., Tee C.H. (2011). Advance in geogrid reinforced slopes in Malaysia. *Geotechnical Engineering*. 2011. No. 42(1). pp. 9-34.
- [21] Xiao C., Luan M., Yang Q., Pei J. (2006). An experimental study on creep behaviour and hyperbolic constitutive model of geogrids with applications. *Geotechnical Special Publication*. 2006. No. 152. pp. 281-286.
- [22] Hsieh C.W. (2005). Ongoing geosynthetics researches of GSI-Taiwan. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142). pp. 3955-3961.
- [23] McGown A., Kupec J., Heerten G., Von Maubeuge, K. (2005). Testing biaxial geogrids for specification and design purposes. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142), pp. 4045-4055.
- [24] Leshchinsky D., Dechasakulsom M., Kaliakin V.N., Ling H.I. (1997). Creep and stress relaxation of geogrids. *Geosynthetics International*. 1997. No. 4(5). pp. 463-479.
- [25] Austin R.A. (1997). The effect of installation activities and fire exposure on geogrid performance. *Geotextiles and Geomembranes*. 1997. No. 15(4-6). pp. 367-376.
- [26] Carter G.R., Dixon J.H. (1995). Oriented polymer grid reinforcement. *Construction and Building Materials*. 1995. No. 9(6). pp. 389-401.
- [27] Jeon H.Y., Lyoo W.S. Engineering performance evaluation of PVA geotextiles. 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. 2008. No. 5. pp. 3604-3611.
- [28] Pinho-Lopes M., Paul A.M., Lopes M.L. (2016). Soil-geosynthetic interaction in pullout and inclined-plane shear for two geosynthetics exhumed after installation damage. *Geosynthetics International*. 2016. No. 23(5). pp. 331-347.
- [29] Ma Q., Xing W.-W., Li L.-H., Xiao H.-L. (2016). Effectiveness of geogrid reinforcement in splicing region in embankment widening. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. No. 21 (16). pp. 5193-5201.
- [30] Razaqpur A. Ghani, Bauer, Gunther E., Halim Abdel O.A., Zhao, Yijun. (1993). Pullout resistance and load-slip response of mechanically damage geogrids. *ASTM Special Technical Publication*. 1993. No. (1190). pp. 195-206.
- [31] Stehr J., Barmag O. (2008). Geotextiles and geogrids an innovative process chain. *International Fiber Journal*. 2008. No. 23(3). pp. 50-51.

- [32] Lou C.-W., Huang C.-L., Hsing W.-H., Tsai M.-C., Lin J.-H. (2016). High strength polyester/polypropylene geogrids: manufacturing techniques and application evaluations. *Journal of the Textile Institute*. 2016. No. pp. 1-8.
- [33] Mosallanezhad M., Alfaro M.C., Hataf N., Sadat Taghavi S.H. (2016). Performance of the new reinforcement system in the increase of shear strength of typical geogrid interface with soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. No. (3). pp. 457-462.
- [34] Hsieh C.W., Lee K., Yoo H.K., Joo, H. (2008). Tensile creep behavior of polyester geogrids by conventional and accelerated test methods. *Fibers and Polymers*. 2008. No. 9(4). pp. 476-480.
- [35] Zou C., Wang Y., Lin J., Chen Y. (2002). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. *Construction and Building Materials*. 2002. No. 114. pp. 763-771.
- [36] Ouria A.A., Toufigh V.B., Desai C.C., Toufigh V.C., Saadatmanesh H.D. (2016). Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall. *Geomechanics and Engineering*. 2016. No. 10(6). pp. 757-774.
- [37] Wang H., Yang G., Liu H., Liu W., Wu L. (2016). Research on dynamic behavior of geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*. 2016. No. 38(2). pp. 131-140.
- [38] Tian Q.B. (2015). The application research of geogrids in road broadening engineering. *Resources, Environment and Engineering - 2nd Technical Congress on Resources, Environment and Engineering, CREE*. 2015. pp. 163-168.
- [39] Wayne M.H. (2016). The Use of Geogrids for the Development of Mechanically Stabilized Layers. *Geotechnical Special Publication*. 2016. pp. 49-60.
- [40] Onur M.I., Tuncan M., Evirgen B., Ozdemir B., Tuncan A. (2016). Behavior of Soil Reinforcements in Slopes. *Procedia Engineering*. 2016. No. 143. pp. 483-489.
- [41] Müller W. (2014). Long-term pull-out resistance and material properties of geogrids. *10th International Conference on Geosynthetics*. 2014. No. ICG 2014.
- [42] Korulla M., Gharpure A., Rimoldi P. (2015). Design of Geogrids for Road Base Stabilization. *Indian Geotechnical Journal*. 2015. No. 45 (4). pp. 458-471.
- [43] Sannikov S., Kuyukov S., Kubasov D. (2016). Increase of a Roadway Covering Durability by Using the Cement-Concrete Base Fragmented with the Geogrid. *MATEC Web of Conferences*. 2016. No.73.
- [44] Hussaini S.K., Indraratna B., Vinod J.S.b. (2016). A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids. *Transportation Geotechnics*. 2016. No. 6. pp. 45-54
- [45] Hegde A., Kadabnakatti S., Sitharam, T.G. (2016). Use of Geocells to Protect Buried Pipelines and Underground Utilities in Soft Clayey Soils. *Geotechnical Special Publication*. 2016. pp. 914-924.
- [46] Hegde A., Kadabnakatti S., Sitharam, T.G. (2016). Use of Geocells to Protect Buried Pipelines and Underground Utilities in Soft Clayey Soils. *Geotechnical Special Publication*. 2016. pp. 914-924.
- [47] Allen S.R. (2015). Geotextile durability. *Geotextiles: From Design to Applications*. 2016. pp. 177-215.
- [48] Lopes M.P., Paula A.M., Lopes M.L. (2015). Pullout response of geogrids after installation. *Geosynthetics International*. 2015. No. 22(5). pp. 339-354.
- [49] Peng F.-L., Li F.-L., Tan Y., Kongkitkul W. (2010). Effects of loading rate on viscoplastic properties of polymer geosynthetics and its constitutive modeling. *Polymer Engineering and Science*. 2010. No. 50 (3). pp. 550-560.
- [50] Zhang Z., Zhu D.Y., Chen T.F., Wang T. (2014). Confined-accelerated creep tests to determine the creep reduction factor. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 539. pp. 769-773.
- [51] Yoo H., Jeon H.-Y., Chan Y.-C. (2010). Evaluation of Engineering Properties of Geogrids for Soil Retaining Walls. *Textile Research Journal*. 2010. No. 80 (2). pp. 184-192.
- [52] ISO/TR 20432:2007 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.
- [53] Xu S., Zhang Y, Wang Z. (2011). Evaluation on stress relaxation properties of geomembrane. *Advanced Materials Research*. 2011. pp. 1572-1576.
- [54] Jeon H. Y, An B. W., Kim, H. J., Kim Y. J., Cui G. Y., Jang Y. S. (2008). Stress relaxation behaviors of nonwoven geotextile composites. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*. 2008. pp 20-24.
- [55] França F.A.N., Bueno B.S. (2011). Creep behavior of geosynthetics using confined-accelerated tests. *Geosynthetics International*. 2011. No. 18(5). pp. 242-254

- [56] Luo W. (2008). Accelerated characterization of creep behavior of plastic geogrids. Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering). 2008. No. 30 (2). pp. 282-284.
- [57] Loginova I.I., Artamonova D.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.Ye. Vliyaniye struktury na vyzkouprugiye svoystva geosinteticheskikh materialov // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2015. №4(56). S. 11–18.
- [58] De Mello. (2015). Influence of soil confinement on the creep behavior of geotextiles. Geotextiles and Geomembranes. 2015. No. 43(4). pp. 351-358.
- [59] Zhang Z., Wei H. (2015). Time-temperature superposition creep tests on geogrids considered with confined load to determine creep reduction factor. Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2015. No. 34. pp. 2715-2720.
- [60] Zhang Z. (2014). Experimental study on the influence of temperature and confined load on the creep characteristics of geogrid. Advanced Materials Research. 2014. pp. 1629-1632.
- [61] Kongkitkul W., Hirakawa D., Tatsuoka F. (2007). Viscous behaviour of geogrids; Experiment and simulation. Soils and Foundations. 2007. No. 47(2). pp. 265-283.
- [62] Xiao C., Luan M., Yang Q., Pei J. (2006). An experimental study on creep behaviour and hyperbolic constitutive model of geogrids with applications. Geotechnical Special Publication. 2006. No. 152. pp. 281-286.
- [63] Cho S.D., Lee K.W., Cazzuffi D.A., Jeon H.Y. (2006). Evaluation of combination effects of installation damage and creep behavior on long-term design strength of geogrids. Polymer Testing. 2006. No. 25(6). pp. 819-828.
- [64] Guo J. H., Cheng W.-G., Zhang B. (2009). Research on creep property of geogrids at a low temperature. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. 2009. No. 30 (10). pp. 3009-3012.
- [65] Navarrete F., Reddy D.V., Lai P. (2001). Creep of geogrid reinforcement for retaining wall backfills. Geosynthetics Conference. 2001. pp. 567-578.
- [66] Zou C., Wang Y., Lin J., Chen Y. (2002). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. Construction and Building Materials. 2002. No. 114. pp. 763-771.
- [67] Zou C., Wang Y., Lin J., Chen Y. (2016). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. Construction and Building Materials. 2016. No. 114. pp. 763-771.
- [68] Hsuan Y.G., Yeo S.S. (2005). Comparing the creep behavior of high density polyethylene geogrid using two acceleration methods. Geotechnical Special Publication. 2005. (130-142). pp. 2887-2901.
- [69] Koo H. J., Kim Y. K. (2005). Lifetime prediction of geogrids for reinforcement of embankments and slopes. Polymer Testing. 2005. No. 24(2). pp. 181-188.
- [70] Tong J., Gong B., Liu J. (2010). Experimental study and prediction on the long-term creep properties for geogrids at different temperatures. 9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World. 2010. pp. 873-876.
- [71] Rowe R.K., Li A.L. (2005). Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations. Geosynthetics International. 2005. No. 12(1). pp. 50-85.
- [72] Navarrete F., Reddy D.V., Lai P. (2001). Creep of geogrid reinforcement for retaining wall backfills. Geosynthetics Conference. 2001. pp. 567-578.
- [73] Jin Y.C., Jeon H.Y. (2014). Analysis of creep deformation behavior of geogrids by limited creep strain and rupture. 10th International Conference on Geosynthetics. 2014.
- [74] Wang H., Yang G., Liu H., Liu W., Wu L. (2016). Research on dynamic behavior of geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face. Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society. 2016. No. 38(2). pp. 131-140.
- [75] Chantachot T.A, Kongkitkul W.A, Tatsuoka F.B. (2016). Load-strain-time behaviors of two polymer geogrids affected by temperature. International Journal of GEOMATE. 2016. No. 10(3). pp. 1896-1876.
- [76] Miyata Y., Bathurst R.J., Allen T.M. (2014). Reliability analysis of geogrid creep data in Japan. Soils and Foundations. 2014. No. 54 (4). pp. 608-620.
- [77] Jeon H.Y., Bouazza A. (2010). Experimental investigation of installation damage for geogrids. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement. 2010. No. 163(4). pp. 197-205.
- [78] Yeo S.S., Hsuan Y.G. (2010). Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-terephthalate geogrids. Geotextiles and Geomembranes. 2010. No. 28(5). pp. 409-421.

- [79] Yan Q.R., Deng W.D., Deng C.Z. (2008). Study on creep strength test of high-strength geogrid. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*. 2008. pp. 105-109.
- [80] Luan M., Xiao C., Yang, Q., Pei J., Li Y. (2006). An experimental study on the creep behavior of geogrids under long-term external loading. *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2006. No. 39 (4). pp. 87-91.
- [81] Tong J., Gong B., Liu J. (2010). Experimental study and prediction on the long-term creep properties for geogrids at different temperatures. *9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World*. 2010. pp. 873-876.
- [82] Yeo S.S., Hsuan Y.G. (2010). Predicting the creep behavior of high density polyethylene geogrid using stepped isothermal method. *Service Life Prediction of Polymeric Materials: Global Perspectives*. 2010. pp. 205-218.
- [83] Luo W. (2008). Accelerated characterization of creep behavior of plastic geogrids. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. 2008. No. 30(2). pp. 282-284.
- [84] Hsieh C.W. (2005). Ongoing geosynthetics researches of GSI-Taiwan. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142). pp. 3955-3961.
- [85] Hsuan Y.G., Yeo S.S. (2005). Comparing the creep behavior of high density polyethylene geogrid using two acceleration methods. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142). pp. 2887-2901.
- [86] Luan M.T., Xiao C.Z., Yang Q., Pei J.J. (2005). Experimental study on creep properties and viscoelasticity constitutive relationship for geogrids. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2005. No. 26(2). pp. 187-192.
- [87] Sieira A.C., Sayão A.S. (2009). Experimental investigation of mechanical damage in geogrids // *Soils and Rocks*. 2009. No. 32(1). pp. 19-30.
- [88] Peng F.L., Li F.L., Hirakawa D., Tatsuoka F. (2011). Deformation and strength characteristics of geogrid-reinforced soil retaining wall under change of loading rate and its FEM simulation. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2011. No. 33(2). pp. 174-180.
- [89] Jeon H.Y. (2010). Evaluation of long-term behaviours of geogrids: A review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. 2010. No. 163(4). pp. 189-195.
- [90] Wang E.L., Xu E.L., Zhang B., Zhong H., Gao Z.K., Chang J.D. (2008). Experimental study on creep properties of plastic geogrid under low temperature. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*. 2008. pp. 70-73.

Viscoelastic properties of geosynthetic materials

N.N. Alekseev ^{1*}, I.A. Kovalenko ², O.N. Stolyarov ³, B.E. Melnikov ⁴

¹⁻⁴*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia*

ARTICLE INFO

review

doi: 10.18720/CUBS.56.2

Article history

Received 16.01.2017

Keywords

Geosynthetics;
viscoelasticity;
creep;
stress relaxation;
time-temperature superposition;
step isothermal method;

ABSTRACT

Nowadays, geosynthetics are finding new applications in civil engineering. At the same time, the actual task is to evaluate and predict their mechanical properties for a long time. Taking into account the viscoelastic nature of synthetic polymers, of which the huge geosynthetics are manufactured, this article discusses options for defining and predicting their viscoelastic properties. The analysis shows the advantages and disadvantages of various methods of investigation the creep of geosynthetics, including direct measurement of creep, time-temperature superposition, step isothermal method.

Contact information:

- 1 * +7(999)2397154, nikolas.alexeeff@yandex.ru (Nikolai Alekseev, Student)
- 2 +7(906)2625247, ilyako27@mail.ru (Ilya Kovalenko, Student)
- 3 +7(812)5526303, oleg.stolyarov@rambler.ru (Oleg Stolyarov, Ph.D., Associate Professor)
- 4 +7(812)5526303, kafedra@ksm.spbstu.ru (Boris Melnikov, Ph.D., Professor)

References

- [1] Sarsby R. W. (2012). *Geosynthetics in Civil Engineering*. Woodhead Publishing Ltd. 2007. pp. 295.
- [2] Koerner R. M. (2012). *Designing With Geosynthetics*, 6th Ed. Xlibris Publ. Co. 2012. 914 pages in two volumes.
- [3] Mounes S.M., Karim M.R., Khodaii A., Almasi M.H. (2016). Evaluation of permanent deformation of geogrid reinforced asphalt concrete using dynamic creep test. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. No. 44(1). pp. 109-116.
- [4] Brown S.F., Brodrick B.V. (1981) The Nottingham pavement test facility. *Transportation Research Record*. 1981. No. 810. pp. 67-72.
- [5] Sandroni S.S., Gomes R.C., Vilar O.M. (2010). Brazilian research and practice with geosynthetics. 9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World. 2010, pp. 3-41.
- [6] Hufenus R., Rügger R., Flum D., Sterba I.J. (2005). Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 2005. No. 23(5). pp. 401-424.
- [7] Kaliakin V.N., Dechasakulsom M. (2002). Development of a general time-dependent model for geogrids. *Geosynthetics International*. 2002. No. 9(4). pp. 319-342.
- [8] Allen T.M., Bathurst R.J. (2002). Soil reinforcement loads in geosynthetic walls at working stress conditions. *Geosynthetics International*. 2002. No. 9 (5-6). pp. 525-566.
- [9] Christopher B.R., Holtz R.D., Berg R.R. (2001). Geosynthetic reinforced embankments on soft foundations. *Geotechnical Special Publication*. 2001. No. 122. pp. 206-236.
- [10] Fourie A.B., Fabian K.J. (1987). Laboratory determination of clay-geotextile interaction. *Geotextiles and Geomembranes*. 1987. No. 6 (4). pp. 275-294.
- [11] Richard A. (1985). Material properties for the design of geotextile reinforced slopes. *Geotextiles and Geomembranes*. 1985. No. 2 (2). pp. 83-109.
- [12] Canestrari F., Ferrotti G., Abuaddous M., Pasquini E. (2012). Geocomposite-reinforcement of polymer-modified asphalt systems. *RILEM Bookseries*. 2012. No. 11. pp. 383-395.
- [13] Leshchinsky B., Evans T.M., Vesper J. (2016). Microgrid inclusions to increase the strength and stiffness of sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. No. 44 (2). pp. 170-177.
- [14] Yang B.-H., Lai J., Lin J.-H., Tsai P.H. (2016). Simulating the loading behavior of reinforced strip footings with a double-yield soil model. *International Journal of Geomechanics*. 2016. No. 16(1).
- [15] Mosallanezhad M., Hataf N., Taghavi S.H. (2016). Experimental and large-scale field tests of grid-anchor system performance in increasing the ultimate bearing capacity of granular soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016. No. 53(7). pp. 1047-1058.
- [16] Singh A., Phanikumar B.R., Prasad R. (2016). Effect of geogrid reinforcement on load carrying capacity of a coarse sand bed. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2016. No. 7(3). pp. 1-6.
- [17] Samal M.R., Saran S., Kumar A., Mukerjee S. (2016). Dynamic behavior of geogrid reinforced pond ash. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. No. 10(2). pp. 114-122.
- [18] AlKayyal H., Althoff S., Tamaskovics N., Klapperich, H., Awwad T. (2014). Supporting structures reinforced by geogrids - The engineering challenge. 10th International Conference on Geosynthetics. 2014.
- [19] Chen Q., Farsakh M.A. (2012). Structural contribution of geogrid reinforcement in pavement. *Geotechnical Special Publication*. 2012. No. (225 GSP). pp. 1468-1475.
- [20] Ooi T.A., Tee C.H. (2011). Advance in geogrid reinforced slopes in Malaysia. *Geotechnical Engineering*. 2011. No. 42(1). pp. 9-34.
- [21] Xiao C., Luan M., Yang Q., Pei J. (2006). An experimental study on creep behaviour and hyperbolic constitutive model of geogrids with applications. *Geotechnical Special Publication*. 2006. No. 152 . pp. 281-286.
- [22] Hsieh C.W. (2005). Ongoing geosynthetics researches of GSI-Taiwan. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142). pp. 3955-3961.
- [23] McGown A., Kupec J., Heerten G., Von Maubeuge, K. (2005). Testing biaxial geogrids for specification and design purposes. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142), pp. 4045-4055.
- [24] Leshchinsky D., Dechasakulsom M., Kaliakin V.N., Ling H.I. (1997). Creep and stress relaxation of geogrids. *Geosynthetics International*. 1997. No. 4(5). pp. 463-479.
- [25] Austin R.A. (1997). The effect of installation activities and fire exposure on geogrid performance. *Geotextiles and Geomembranes*. 1997. No. 15(4-6). pp. 367-376.
- [26] Carter G.R., Dixon J.H. (1995). Oriented polymer grid reinforcement. *Construction and Building Materials*. 1995. No. 9(6). pp. 389-401.

- [27] Jeon H.Y., Lyoo W.S. Engineering performance evaluation of PVA geotextiles. 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. 2008. No. 5. pp. 3604-3611.
- [28] Pinho-Lopes M., Paul A.M., Lopes M.L. (2016). Soil-geosynthetic interaction in pullout and inclined-plane shear for two geosynthetics exhumed after installation damage. *Geosynthetics International*. 2016. No. 23(5). pp. 331-347.
- [29] Ma Q., Xing W.-W., Li L.-H., Xiao H.-L. (2016). Effectiveness of geogrid reinforcement in splicing region in embankment widening. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. No. 21 (16). pp. 5193-5201.
- [30] Razaqpur A. Ghani, Bauer, Gunther E., Halim Abdel O.A., Zhao, Yijun. (1993). Pullout resistance and load-slip response of mechanically damage geogrids. *ASTM Special Technical Publication*. 1993. No. (1190). pp. 195-206.
- [31] Stehr J., Barmag O. (2008). Geotextiles and geogrids an innovative process chain. *International Fiber Journal*. 2008. No. 23(3). pp. 50-51.
- [32] Lou C.-W., Huang C.-L., Hsing W.-H., Tsai M.-C., Lin J.-H. (2016). High strength polyester/polypropylene geogrids: manufacturing techniques and application evaluations. *Journal of the Textile Institute*. 2016. No. pp. 1-8.
- [33] Mosallanezhad M., Alfaro M.C., Hataf N., Sadat Taghavi S.H. (2016). Performance of the new reinforcement system in the increase of shear strength of typical geogrid interface with soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. No. (3). pp. 457-462.
- [34] Hsieh C.W., Lee K., Yoo H.K., Jeo, H. (2008). Tensile creep behavior of polyester geogrids by conventional and accelerated test methods. *Fibers and Polymers*. 2008. No. 9(4). pp. 476-480.
- [35] Zou C., Wang Y., Lin J., Chen Y. (2002). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. *Construction and Building Materials*. 2002. No. 114. pp. 763-771.
- [36] Ouria A.A , Toufigh V.B, Desai C.C, Toufigh V.C, Saadatmanesh H.D. (2016). Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall. *Geomechanics and Engineering*. 2016. No. 10(6). pp. 757-774.
- [37] Wang H., Yang G., Liu H., Liu W., Wu L. (2016). Research on dynamic behavior of geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*. 2016. No. 38(2). pp. 131-140.
- [38] Tian Q.B. (2015). The application research of geogrids in road broadening engineering. *Resources, Environment and Engineering - 2nd Technical Congress on Resources, Environment and Engineering, CREE*. 2015. pp. 163-168.
- [39] Wayne M.H. (2016). *The Use of Geogrids for the Development of Mechanically Stabilized Layers*. Geotechnical Special Publication. 2016. pp. 49-60.
- [40] Onur M.I., Tuncan M., Evirgen B., Ozdemir B., Tuncan A. (2016). Behavior of Soil Reinforcements in Slopes. *Procedia Engineering*. 2016. No. 143. pp. 483-489.
- [41] Müller W. (2014). Long-term pull-out resistance and material properties of geogrids. 10th International Conference on Geosynthetics. 2014. No. ICG 2014.
- [42] Korulla M., Gharpure A., Rimoldi P. (2015). Design of Geogrids for Road Base Stabilization. *Indian Geotechnical Journal*. 2015. No. 45 (4). pp. 458-471.
- [43] Sannikov S., Kuyukov S., Kubasov D. (2016). Increase of a Roadway Covering Durability by Using the Cement-Concrete Base Fragmented with the Geogrid. *MATEC Web of Conferences*. 2016. No.73.
- [44] Hussaini S.K., Indraratna B., Vinod J.S.b. (2016). A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids. *Transportation Geotechnics*. 2016. No. 6. pp. 45-54
- [45] Hegde A., Kadabnakatti S., Sitharam, T.G. (2016). Use of Geocells to Protect Buried Pipelines and Underground Utilities in Soft Clayey Soils. *Geotechnical Special Publication*. 2016. pp. 914-924.
- [46] Hegde A., Kadabnakatti S., Sitharam, T.G. (2016). Use of Geocells to Protect Buried Pipelines and Underground Utilities in Soft Clayey Soils. *Geotechnical Special Publication*. 2016. pp. 914-924.
- [47] Allen S.R. (2015). Geotextile durability. *Geotextiles: From Design to Applications*. 2016. pp. 177-215.
- [48] Lopes M.P., Paula A.M., Lopes M.L. (2015). Pullout response of geogrids after installation. *Geosynthetics International*. 2015. No. 22(5). pp. 339-354.
- [49] Peng F.-L., Li F.-L., Tan Y., Kongkitkul W. (2010). Effects of loading rate on viscoplastic properties of polymer geosynthetics and its constitutive modeling. *Polymer Engineering and Science*. 2010. No. 50 (3). pp. 550-560.
- [50] Zhang Z., Zhu D.Y., Chen T.F., Wang T. (2014). Confined-accelerated creep tests to determine the creep reduction factor. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 539. pp. 769-773.
- [51] Yoo H., Jeon H.-Y., Chan Y.-C. (2010). Evaluation of Engineering Properties of Geogrids for Soil Retaining Walls. *Textile Research Journal*. 2010. No. 80 (2). pp. 184-192.
- [52] ISO/TR 20432:2007 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.

- [53] Xu S., Zhang Y., Wang Z. (2011). Evaluation on stress relaxation properties of geomembrane. *Advanced Materials Research*. 2011. pp. 1572-1576.
- [54] Jeon H. Y., An B. W., Kim, H. J., Kim Y. J., Cui G. Y., Jang Y. S. (2008). Stress relaxation behaviors of nonwoven geotextile composites. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*. 2008. pp 20-24.
- [55] França F.A.N., Bueno B.S. (2011). Creep behavior of geosynthetics using confined-accelerated tests. *Geosynthetics International*. 2011. No. 18(5). pp. 242-254
- [56] Luo W. (2008). Accelerated characterization of creep behavior of plastic geogrids. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. 2008. No. 30 (2). pp. 282-284.
- [57] Loginova I.I., Artamonova D.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.Ye. Vliyaniye struktury na vyzkouprugiye svoystva geosinteticheskikh materialov // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2015. №4(56). S. 11–18.
- [58] De Mello. (2015). Influence of soil confinement on the creep behavior of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*. 2015. No. 43(4). pp. 351-358.
- [59] Zhang Z., Wei H. (2015). Time-temperature superposition creep tests on geogrids considered with confined load to determine creep reduction factor. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2015. No. 34. pp. 2715-2720.
- [60] Zhang Z. (2014). Experimental study on the influence of temperature and confined load on the creep characteristics of geogrid. *Advanced Materials Research*. 2014. pp. 1629-1632.
- [61] Kongkitkul W., Hirakawa D., Tatsuoka F. (2007). Viscous behaviour of geogrids; Experiment and simulation. *Soils and Foundations*. 2007. No. 47(2). pp. 265-283.
- [62] Xiao C., Luan M., Yang Q., Pei J. (2006). An experimental study on creep behaviour and hyperbolic constitutive model of geogrids with applications. *Geotechnical Special Publication*. 2006. No. 152. pp. 281-286.
- [63] Cho S.D., Lee K.W., Cazzuffi D.A., Jeon H.Y. (2006). Evaluation of combination effects of installation damage and creep behavior on long-term design strength of geogrids. *Polymer Testing*. 2006. No. 25(6). pp. 819-828.
- [64] Guo J. H., Cheng W.-G., Zhang B. (2009). Research on creep property of geogrids at a low temperature. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2009. No. 30 (10). pp. 3009-3012.
- [65] Navarrete F., Reddy D.V., Lai P. (2001). Creep of geogrid reinforcement for retaining wall backfills. *Geosynthetics Conference*. 2001. pp. 567-578.
- [66] Zou C., Wang Y., Lin J., Chen Y. (2002). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. *Construction and Building Materials*. 2002. No. 114. pp. 763-771.
- [67] Zou C., Wang Y., Lin J., Chen Y. (2016). Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. *Construction and Building Materials*. 2016. No. 114. pp. 763-771.
- [68] Hsuan Y.G., Yeo S.S. (2005). Comparing the creep behavior of high density polyethylene geogrid using two acceleration methods. *Geotechnical Special Publication*. 2005. (130-142). pp. 2887-2901.
- [69] Koo H. J., Kim Y. K. (2005). Lifetime prediction of geogrids for reinforcement of embankments and slopes. *Polymer Testing*. 2005. No. 24(2). pp. 181-188.
- [70] Tong J., Gong B., Liu J. (2010). Experimental study and prediction on the long-term creep properties for geogrids at different temperatures. *9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World*. 2010. pp. 873-876.
- [71] Rowe R.K., Li A.L. (2005). Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations. *Geosynthetics International*. 2005. No. 12(1). pp. 50-85.
- [72] Navarrete F., Reddy D.V., Lai P. (2001). Creep of geogrid reinforcement for retaining wall backfills. *Geosynthetics Conference*. 2001. pp. 567-578.
- [73] Jin Y.C., Jeon H.Y. (2014). Analysis of creep deformation behavior of geogrids by limited creep strain and rupture. *10th International Conference on Geosynthetics*. 2014.
- [74] Wang H., Yang G., Liu H., Liu W., Wu L. (2016). Research on dynamic behavior of geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*. 2016. No. 38(2). pp. 131-140.
- [75] Chantachot T.A., Kongkitkul W.A., Tatsuoka F.B. (2016). Load-strain-time behaviors of two polymer geogrids affected by temperature. *International Journal of GEOMATE*. 2016. No. 10(3). pp. 1896-1876.
- [76] Miyata Y., Bathurst R.J., Allen T.M. (2014). Reliability analysis of geogrid creep data in Japan. *Soils and Foundations*. 2014. No. 54 (4). pp. 608-620.

- [77] Jeon H.Y., Bouazza A. (2010). Experimental investigation of installation damage for geogrids. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement. 2010. No. 163(4). pp. 197-205.
- [78] Yeo S.S., Hsuan Y.G. (2010). Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-terephthalate geogrids. Geotextiles and Geomembranes. 2010. No. 28(5). pp. 409-421.
- [79] Yan Q.R., Deng W.D., Deng C.Z. (2008). Study on creep strength test of high-strength geogrid. Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics. 2008. pp. 105-109.
- [80] Luan M., Xiao C., Yang, Q., Pei J., Li Y. (2006). An experimental study on the creep behavior of geogrids under long-term external loading. Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal. 2006. No. 39 (4). pp. 87-91.
- [81] Tong J., Gong B., Liu J. (2010). Experimental study and prediction on the long-term creep properties for geogrids at different temperatures. 9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World. 2010. pp. 873-876.
- [82] Yeo S.S., Hsuan Y.G. (2010). Predicting the creep behavior of high density polyethylene geogrid using stepped isothermal method. Service Life Prediction of Polymeric Materials: Global Perspectives. 2010. pp. 205-218.
- [83] Luo W. (2008). Accelerated characterization of creep behavior of plastic geogrids. Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering). 2008. No. 30(2). pp. 282-284.
- [84] Hsieh C.W. (2005). Ongoing geosynthetics researches of GSI-Taiwan. Geotechnical Special Publication. 2005. (130-142). pp. 3955-3961.
- [85] 85. [85] Hsuan Y.G., Yeo S.S. (2005). Comparing the creep behavior of high density polyethylene geogrid using two acceleration methods. Geotechnical Special Publication. 2005. (130-142). pp. 2887-2901.
- [86] Luan M.T., Xiao C.Z., Yang Q., Pei J.J. (2005). Experimental study on creep properties and viscoelasticity constitutive relationship for geogrids. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics. 2005. No. 26(2). pp. 187-192.
- [87] Sieira A.C., Sayão A.S. (2009). Experimental investigation of mechanical damage in geogrids // Soils and Rocks. 2009. No. 32(1). pp. 19-30.
- [88] Peng F.L., Li F.L., Hirakawa D., Tatsuoka F. (2011). Deformation and strength characteristics of geogrid-reinforced soil retaining wall under change of loading rate and its FEM simulation. Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2011. No. 33(2). pp. 174-180.
- [89] Jeon H.Y. (2010). Evaluation of long-term behaviours of geogrids: A review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement. 2010. No. 163(4). pp. 189-195.
- [90] Wang E.L., Xu E.L., Zhang B., Zhong H., Gao Z.K., Chang J.D. (2008). Experimental study on creep properties of plastic geogrid under low temperature. Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics. 2008. pp. 70-73.

Алексеев Н.Н., Коваленко И.А., Столяров О.Н., Мельников Б.Е. Вязкоупругие свойства геосинтетических материалов, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №5 (56). С. 17-32.

Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. Viscoelastic properties of geosynthetic materials. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 5(56). Pp. 17-32. (rus)