Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 12 (27). 2014. 49-63

Construction of Unique Buildings and Structures

journal homepage: www.unistroy.spb.ru

Ползучесть полиэтилена высокой прочности при различных режимах нагружения

И.П. Николаева[1], **Л.И. Огородов**[2], **С.В. Красиков**[3]

[1,2] *ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет», 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.*

[3] *ЗАО «Вологодский лесохимический завод», 160024, Россия, Вологда, ул. Канифольная, 1.*

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 69 Научная статья	Подана в редакцию 08 декабря 2014 Принята 29 декабря 2014	ползучесть, полиэтилен, уравнение механических состояний, статика, цикличность, плоское напряженное состояние

АННОТАЦИЯ

Уравнение механических состояний при описании ползучести полиэтилена высокой плотности при нестационарных режимах статического и циклического нагружения в условиях плоского напряженного состояния было построено на основании экспериментальных результатов. Оно учитывает мгновенноупругую, вязкоупругую, мгновеннопластическую и вязкопластическую составляющие деформаций с использованием условий постоянства объёма материала. Условия подобия девиаторов напряжений и деформаций применяются с учетом полученного уравнения. Введение параметров являющихся функциями вида девиаторов напряжений, так же учитываются в этом уравнении. Полученные из расчета деформации ползучести при стационарном и нестационарном статическом и циклическом нагружении удовлетворительно описывается предложенным уравнением, что следует из сопоставления с данными эксперимента.

Содержание

1 *Контактный автор:*
+7 (921) 305 7062, inna4i4n@mail.ru (Николаева Инна Павловна, к.т.н., доцент)

2 +7 (812) 552 6303, L.ogorodov@mail.ru (Огородов Леонид Иванович, к.т.н., доцент)

3 +7 (8172) 716-2601, Serezhka@mail.ru (Красиков Сергей Валерьевич, генеральный директор)

Введение

Для проведения расчетов на ползучесть элементов конструкций из материалов с реологическими свойствами (противофильтрационные полимерные экраны, облицовки, крепления, нежесткие покрытия в гидротехническом и в дорожном строительстве, силовые и декоративные стержни, балки, пластины и оболочки, в частности трубопроводы в промышленном и гражданском строительстве) необходимо располагать уравнениями механических состояний. Уравнения могут быть построены чисто в феноменологическом плане, либо в их основу могут быть положены механические или физические модели описываемых деформационных процессов.

Обзор литературы

Важным классом конструкционных материалов с реономными свойствами, исследованию которых посвящена литература [1-10], отличающаяся значительным разнообразием подходов к расчету деформаций и времени разрушения, являются полимерные и полимерные композиционные материалы, металлы и сплавы при высоких термомеханических нагрузках, а также при воздействиях среды и некоторых энергетических полей. Ряд материалов, используемых для изготовления элементов конструкций, рассчитанных на длительный срок эксплуатации, испытывает старение, отражающееся на сопротивлении деформированию и разрушению.

Постановка задачи и актуальность исследования

В общем случае полная деформация, развивающаяся при длительном нагружении, является суммой четырех составляющих: мгновенноупругой, мгновеннопластической, вязкоупругой и вязкопластической [1, 2, 11-17].

Разделение полных деформаций на реономные и склерономные в начале процесса нагружения является в определенной степени условным. В данной работе под прямой ползучестью понимается рост деформаций во времени при постоянно снижающихся нагрузках. При нарастании нагрузок от нуля до тех значений, которые по расчету отвечают заданным истинным напряжениям ползучести, возникают малые вязкоупругие и вязкопластические деформации, выделение которых из общей деформации является почти неразрешимой задачей. Однако с этой условностью приходится мириться, и она не мешает составлению уравнения механических состояний. При малых временах нагружения соотношение между составляющими деформации оказывается не совсем правильным, но при этом общий итог должен все же отвечать действительности, с другой стороны, учет всех четырех составляющих деформации, если только опыты не указывают на явное отсутствие каких-либо из них (например, вязкопластической и мгновеннопластической составляющих), придает уравнению состояний большую гибкость, позволяющую удовлетворительно описывать практические любые релаксационные процессы.

Полимерные материалы могут иметь в общем случае как сдвиговую, так и объёмную ползучесть. Однако при плоском напряженном состоянии проявляется, главным образом, сдвиговая ползучесть, протекающая при условии постоянства объёма, которое при линейном напряжённом состоянии полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) проверялось в работе [11]. Ввиду этого будем считать, что в наших опытах ползучесть носит преимущественно сдвиговой характер, а объёмная ползучесть имеет место в незначительной степени или отсутствует.

В данной работе построено уравнение механических состояний, в основе которого лежит результат опытов по деформированию тонкостенных трубчатых образцов полиэтилена высокой плотности (степень кристалличности по методу Германса-Вейдингера 58%) при различных кратковременных и длительных режимах нагружения осевой силой и внутренним давлениям [18, 19]. Испытания полимерных материалов проводились в широком диапазоне напряжений, включая предельные напряжения [20].

Описание исследования

Для подбора приближенных законов мгновенноупругого и мгновеннопластического деформирования использовались данные опытов на монотонное нагружение (со скоростью $d\sigma_i/d\tau = 0.1 \div 0.3$ МПа/с) с регистрацией и последующим мгновенным разгружением образца. При этом замерялись мгновенноупругие и остаточные (мгновеннопластические) деформации. Опыты проводились при нескольких уровнях интенсивности напряжений и различных видах напряженного состояния. Зависимость мгновенноупругих деформаций от интенсивности напряжений σ_i для исследуемых материалов аппроксимировались в следующем виде [21]:

$$\varepsilon_i^{y} = \frac{2(1+\nu)\sigma_i}{3E_0\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_{**}}\right)}, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{\varepsilon_i^{y}}$ - интенсивность мгновенноупругой деформации.

Зависимость мгновеннопластических деформаций $\boldsymbol{\varepsilon_i^{\text{МП}}}$ материалов от интенсивности напряжений представлена в виде [21]:

$$\varepsilon_i^{\text{МП}} = \gamma(e^{\frac{m\sigma_i}{\sigma_*}} - 1) \tag{2}$$

Для исследования вязкоупругой составляющей деформации ползучести ставились опыты на обратную ползучесть (возврат после разгрузки). Член уравнения, описывающий зависимость от времени вязкоупругой составляющей полной деформации, при пропорциональном нагружении записывался в виде:

$$\varepsilon_i^{\text{ВУ}} = \int_0^{\tau} f_1(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}) f_2(\mu_s) K(\tau-\theta)d\theta \tag{3}$$

Эта зависимость требует подобия кривых обратной ползучести. Экспериментальные данные показывают, что условие подобия приблизительно выполняется. Ядро $\boldsymbol{K(\tau)}$ аппроксимировалось суммой двух экспонент:

$$K(\tau) = A_1 e^{-\tau/\mu_1} + A_2 e^{-\tau/\mu_2} \tag{4}$$

Подбор постоянных упрощается тем обстоятельством, что при больших временах обратной ползучести графики скоростей в полулогарифмических координатах являются практически прямыми, следовательно, описываются одной экспонентой с относительно большим временем релаксации $\boldsymbol{\mu_2}$. После подбора первой экспоненты определяется вторая с малым временем релаксации.

Точность описания обратной ползучести можно, естественно, повысить путем увеличения числа экспонент в ядре $\boldsymbol{K(\tau)}$. Однако, во избежание значительных усложнений расчетов, сохраняем в выражении ядра всего две экспоненты.

Для подбора функции $\boldsymbol{f_1(\frac{\sigma_i}{\sigma_*})}$ использовался график зависимости $\boldsymbol{\varepsilon_i^{\text{ВП}}/\int_0^{\tau} K(\tau-\theta)d\theta}$ относительно $\boldsymbol{\frac{\sigma_i}{\sigma_*}}$ при её аппроксимации:

$$f_1\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right) = \text{c}(\frac{\sigma_i}{\sigma_*})^n \tag{5}$$

Вид функции $\boldsymbol{f_2(\mu_s)}$ установлен путем сравнения результатов испытаний при различных видах девиатора истинных напряжений ($\boldsymbol{\mu_s}$ – параметр Лоде). Рассеивание экспериментальных данных оказывается довольно значительным (основное отклонение $\boldsymbol{\Delta f_2(\mu_s)}$ = 0,156 при коэффициенте корреляции z = 0,97) в случае линейной аппроксимации функции $\boldsymbol{f_2(\mu_s)}$:

$$f_2(\mu_s) = a - b\mu_s \tag{6}$$

Обратимся к другому члену уравнения механических состояний, описывающему зависимость от времени вязкопластической составляющей полной деформации. График этой зависимости получен путем вычитания из полной деформации ползучести при стационарном нагружении трех, ранее выделенных, составляющих. Как показывают расчеты, полученные кривые необратимой прямой ползучести приблизительно подобны, что в соответствии с [11] позволяет применить для аналитического описания вязкопластических деформаций соотношение вида:

$$\varepsilon_i^{\text{ВП}} = f_3(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}) f_4(\mu_s) B(\tau)d\tau, \tag{7}$$

где: $\boldsymbol{\varepsilon_i}$ - скорость интенсивности вязкопластических деформаций и $\boldsymbol{B(\tau)}$ - убывающая функция времени.

Интенсивность вязкопластических деформаций определяется при стационарном нагружении интегралом

$$\varepsilon_i^{\text{ВП}} = \int_0^\tau f_3(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}) f_4(\mu_s) B(\tau) d\tau. \tag{8}$$

Функция $\boldsymbol{B(\tau)}$ находилась по графику скорости вязкопластической деформации при $\boldsymbol{\sigma_i} = \boldsymbol{\sigma}_{*.}$. Эта функция была аппроксимирована зависимостью:

$$B(\tau) = A_3 e^{-(\tau-\tau_.)/\propto}. \tag{9}$$

Методика определения функций $\boldsymbol{f_3}(\frac{\boldsymbol{\sigma_i}}{\boldsymbol{\sigma_*}})$ и $\boldsymbol{f_4}(\boldsymbol{\mu_s})$ остается такой же, как и при определении функций $\boldsymbol{f_1}\left(\frac{\boldsymbol{\sigma_i}}{\boldsymbol{\sigma_*}}\right)$ и $\boldsymbol{f_2}(\boldsymbol{\mu_s})$. Функция $\boldsymbol{f_3}(\frac{\boldsymbol{\sigma_i}}{\boldsymbol{\sigma_*}})$ на участке достаточно больших деформаций удовлетворительно аппроксимировалась линейной зависимостью (коэффициент корреляции 0,92)

$$f_3\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right) = K(\frac{\sigma_i}{\sigma_*} - \delta). \tag{10}$$

При меньших отклонениях, как и при $\boldsymbol{\tau} < \boldsymbol{\tau}_*$, вязкопластические деформации вообще отсутствуют, а ползучесть происходит только за счет вязкоупругой составляющей деформации.

Функция $\boldsymbol{f_4}(\boldsymbol{\mu_s})$ аппроксимировалась линейным соотношением вида (основное отклонение $\Delta\boldsymbol{f_4}(\boldsymbol{\mu_s}) = \boldsymbol{0,15}$)

$$f_4(\mu_s) = d - l\mu_s. \tag{11}$$

Таким образом, выделены и описаны все составляющие полной деформации исследуемого материала. Полное уравнение механических состояний в интенсивностях при стационарном нагружении имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3}\frac{(1+\nu)\sigma_i}{E_0\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_{**}}\right)} + \gamma\left(e^{m\frac{\sigma_i}{\sigma_*}} - 1\right) + \int_0^\tau (a - b\mu_s) c \frac{\sigma_i}{\sigma_*}\left[A_1 e^{-\frac{\tau}{\mu_1}} + A_2 e^{-\frac{\tau}{\mu_2}}\right] d\theta +$$
$$+ \int_0^\tau (d - l\mu_s) K(\frac{\sigma_i}{\sigma_*} - \delta)\left[A_3 e^{-(\tau-\tau_.)/\propto}\right] d\tau. \tag{12}$$

Уравнение (12) в компонентах девиаторов напряжений и деформаций записывается в следующем виде:

$$e_{ij} = \frac{(1+\nu)S_{ij}}{E_0\left(1-\frac{\sigma_i}{\sigma_{**}}\right)} + \frac{3}{2}\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\gamma\left(e^{m\frac{\sigma_i}{\sigma_*}} - 1\right) + \frac{3}{2}\int_0^\tau (a - b\mu_s) c \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right)^n \left[A_1 e^{-\frac{\tau}{\mu_1}} + A_2 e^{-\frac{\tau}{\mu_2}}\right] d\theta +$$
$$+ \frac{3}{2}\int_0^\tau (d - l\mu_s) K(\frac{\sigma_i}{\sigma_*} - \delta)\left[A_3 e^{-(\tau-\tau_.)/\propto}\right] d\tau, \tag{13}$$

где для полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) получили:

$$E_0 = 960 \text{ МПа};\ \sigma_{**} = 30 \text{ МПа};\ \nu = 0.48;\ \gamma = 1\cdot 10^{-4}; m = 2{,}5; \sigma_* = 10\text{МПа}; a = 0.6; b = -0.64;$$
$$c = 0.07; n = 4;\ A_1 = 8.5\cdot 10^{-4};\ A_2 = 1.6\cdot 10^{-4}; \mu_1 = 110\text{с};\ \mu_2 = 2250\text{с};$$
$$d = 0.7; l = 0.3;\ \delta = 1.37; K = 3.4;\ A_3 = 11\cdot 10^{-6};\ \propto = 1.25\cdot 10^4\text{с}$$

В более общем случае пропорционального нагружения первое слагаемое в выражениях (12, 13) сохраняет тот же вид, а второе слагаемое сохраняет формально тот же вид с дополнительным условием, что в качестве $\boldsymbol{\sigma_i}$ мы должны вносить наибольшее значение интенсивности напряжений на рассматриваемом участке нагружения.

Закон мгновеннопластического деформирования при сложном напряженном состоянии и непропорциональном нагружении формировался в соответствии с обобщенной теорией пластического течения

$$de_{ij}{}^{\text{МП}} = \frac{3}{2}\frac{de_{i\text{МП}}{}^* S_{ij}}{\sigma_i} \tag{14}$$

где $\boldsymbol{de_{i\text{МП}}}^* = \sqrt{\sum \boldsymbol{de_{ij\text{МП}}}^{\boldsymbol{2}}}$ - приращение инварианта Одквиста.

Для случая ступенчатого (нестационарного) режима нагружения применялся обобщённый закон вязкопластического деформирования:

$$\varepsilon_i{}^{\text{ВП}} = \int_0^{\tau} f_3\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right) f_4(\mu_s) B(\tau) d\tau + \int_0^{\tau} d\xi \int_0^{\xi} \frac{d}{d\theta} f_3\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right) f_4(\mu_s) B(\xi-\theta) d\theta \tag{15}$$

Проверка применимости уравнений (12, 13) механических состояний осуществлялась на нестационарных режимах статического нагружения исследуемого материала (ПЭВП). Режимы настационарного статического нагружения приведены на рисунках 1-3. Здесь же показаны зависимости интенсивности истинных деформаций от времени. Сравнение экспериментальных и расчетных данных проводилось для ПЭВП при девяти режимах нагружения. Оно показывает, что расчет в целом воссоздаёт процесс ползучести при сложном режиме нагружении с удовлетворительной точностью. Исследование источников наблюдаемых расхождений показало, что эти расхождения связаны, прежде всего, с недостаточно точной аппроксимацией функции $\boldsymbol{K(\tau)}$. Уравнения механических состояний в виде (12) и (13) дают адекватное описание деформационных процессов рассматриваемого материала при сложных ступенчатых режимах статического нагружения и может быть использовано для прогнозирования деформаций ползучести [23-25].

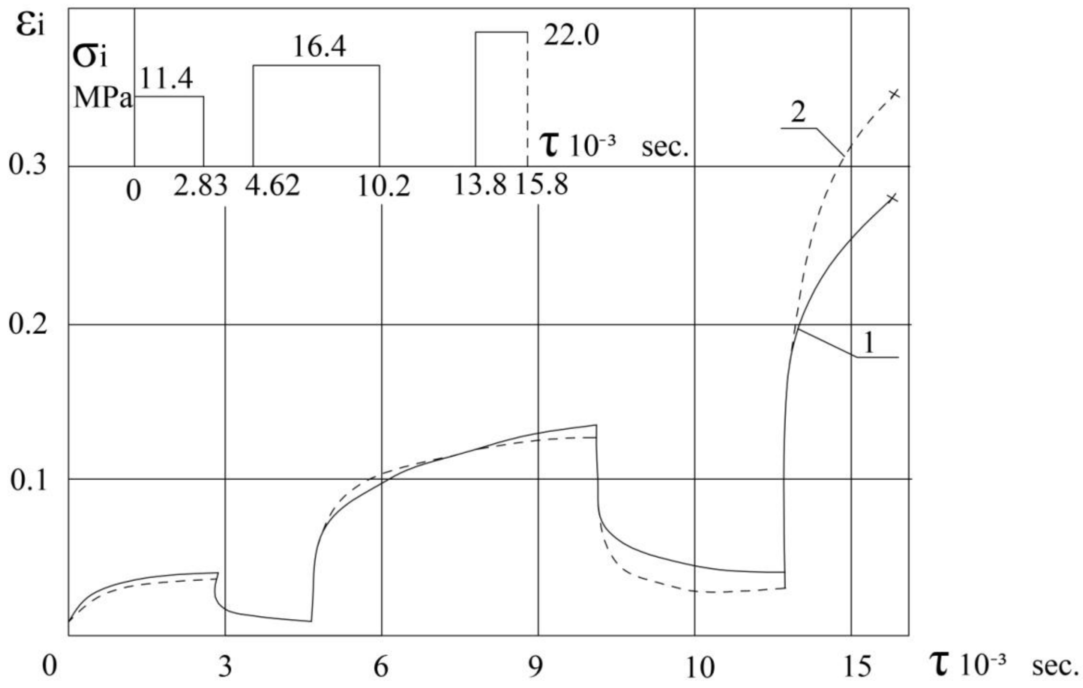

Рисунок 1. Режим нестационарного статического нагружения и кривые ползучести ПЭВП ($\sigma_x / \sigma_\theta = 1$): 1– опытные кривые; 2 – расчетные кривые

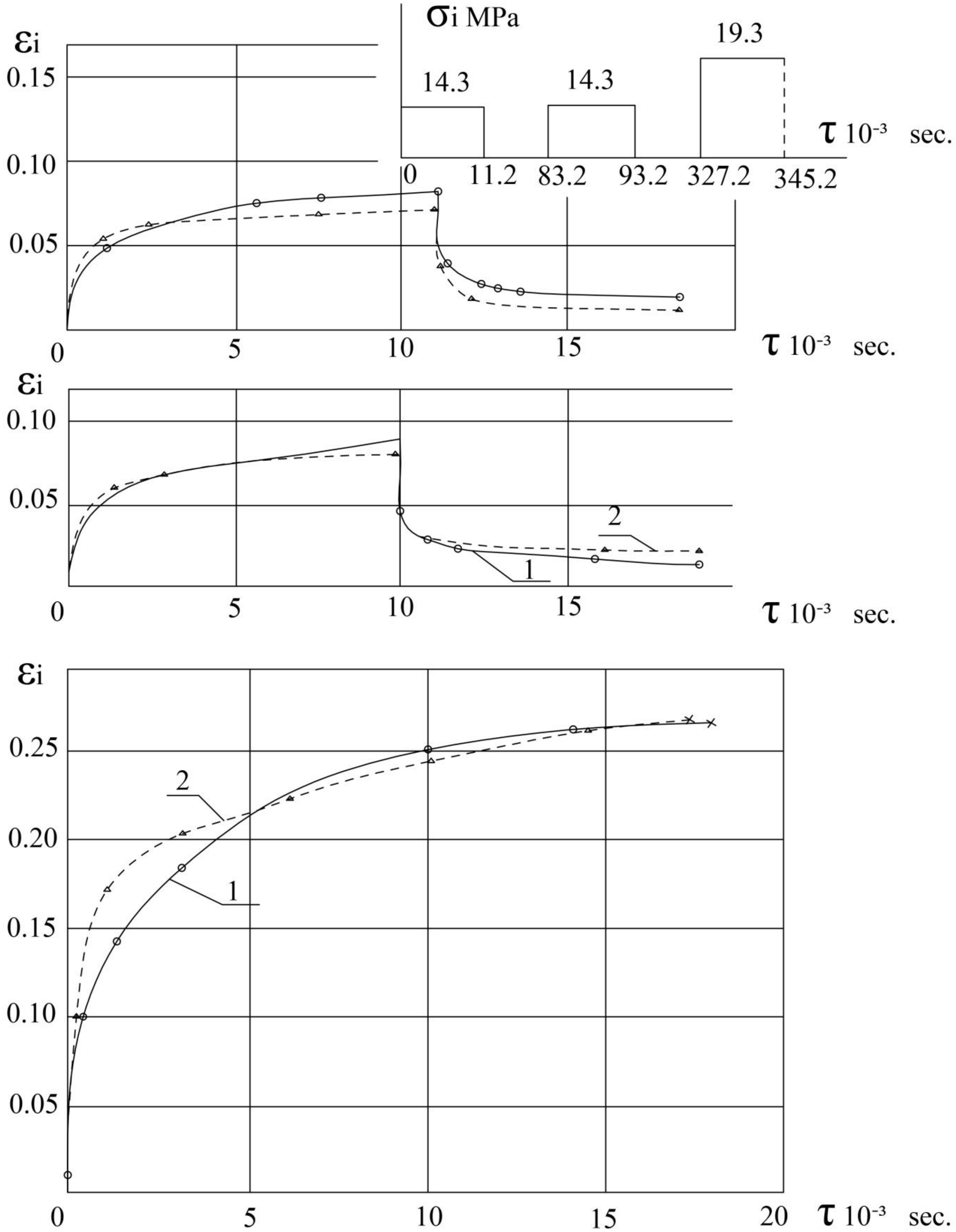

Рисунок 2. Режим нестационарного статического нагружения и кривые ползучести ПЭВП ($\sigma_x / \sigma_\theta = 0,75$): 1– опытные кривые; 2 – расчетные кривые

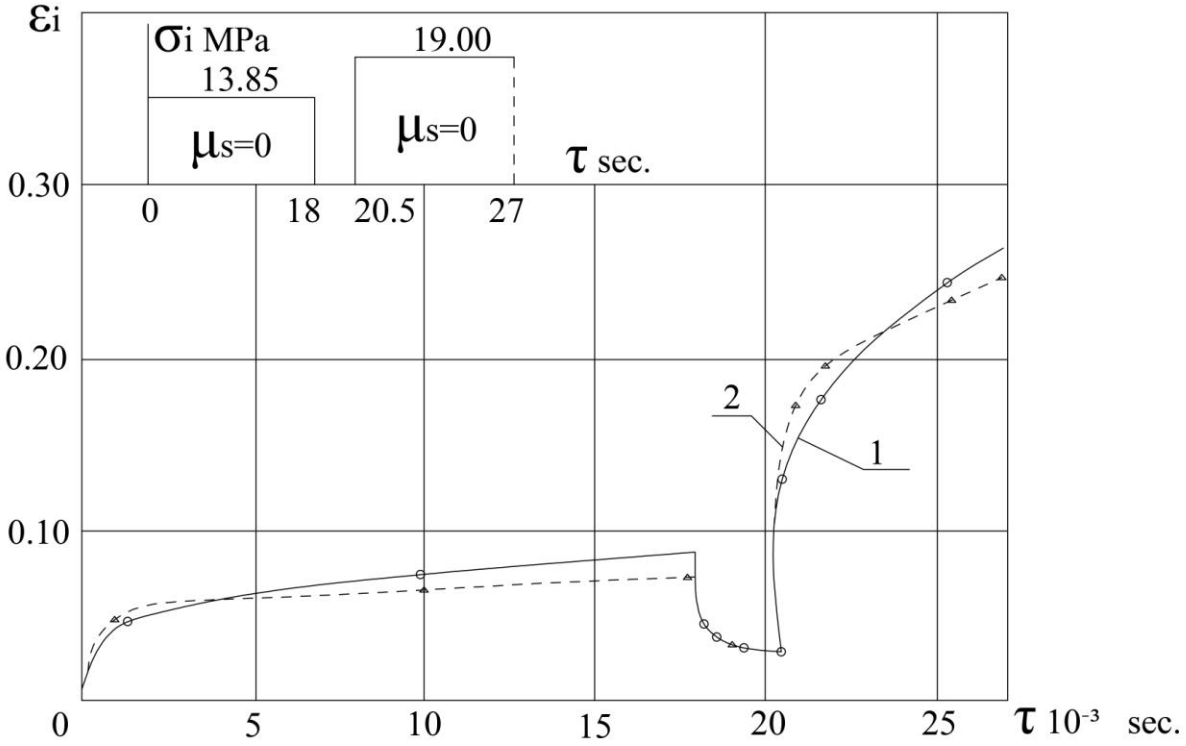

Рисунок 3. Режим непропорционального статического нагружения и кривые ползучести ПЭВП: 1 – опытные кривые; 2 – расчетные кривые

Постоянные и функциональные параметры уравнений механических состояний полимерных и полимерных композиционных материалов существенно зависят от температуры [2]. Если от температуры зависят лишь временные параметры уравнений, то при некоторых дополнительных условиях устанавливается температурно-временная аналогия, по которой процесс неизотермического нагружения сводится к изотермическому в приведенном времени. В области физической нелинейности материала от температуры зависят не только временные, но и силовые параметры уравнений (12) и (13). В таких случаях предложен прием преобразования ступенчатого неизотермического режима нагружения к эквивалентному изотермическому режиму [2, 13, 14]. Конечные значения вязкоупругой и вязкопластической составляющих полной деформации получаются наложением ряда импульсов нагружения, приложенных в действительные или приведенные моменты времени.

Естественное старение (время старения τ_c) и поврежденность (мера П) при длительном нагружении влияют на процесс ползучести материала и на величину предельной деформации [22]. Накопленные деформации и повреждения изменяют соотношения между составляющими полной деформации при ступенчатых (с частичными или полными промежуточными разгрузками) режимах нагружения. При длительной разгрузке после нагружения в материале происходит ряд конкурирующих процессов, в частности залечивание повреждений и естественное старение. Уравнения (12) и (13) включают функциональные параметры (зависящие от τ_c и П), которые устанавливаются на основе результатов дополнительных опытов [23, 25, 26]. Учет меры повреждений П оказывается эффективным при описании деформаций, непосредственно предшествующих моменту разрушения.

Очевидной является попытка применения предлагаемых уравнений механических состояний к условиям циклического напряженного состояния [11, 27, 28]. Мгновенные составляющие полной деформации вычисляются по максимальным за период цикла напряжения. Вязкоупругая может быть вычислена непосредственно подстановкой переменных значений напряжений. Для расчета вязкопластической составляющей предлагается ряд подходов [11, 27]. В ряде работ предлагается использовать понятие приведенного времени. Приведенное время связано с физическим временем при помощи некоторого масштабного коэффициента. Для построения теоретически обоснованного уравнение механических состояний исследование продолжается.

Для расчета деформаций ползучести при циклическом нагружении использовали эмпирическую зависимость, которая приводит к удовлетворительному описанию экспериментальных данных. Уравнение состояний представляется в виде:

$$\varepsilon_{max}^{i}=\frac{2}{3}\frac{(1+\nu)\sigma_i{}^{max}}{E_0(1-\frac{\sigma_i{}^{max}}{\sigma_{**}})}+\left[(\alpha-\beta\mu_s)e^{m\frac{\sigma_i{}^{max}}{\sigma_{**}}}-1\right]\gamma+(a+b\mu_s)\lambda_2 c\left(\frac{\sigma_i{}^{max}}{\sigma_{**}}\right)^n\int_0^\tau K(\tau-\theta)d\theta+(d-l\mu_s)\overline{\overline{K}}\left(\frac{\sigma_i{}^{max}}{\sigma_{**}}-\delta\right)\int_0^\tau B(\tau)d\tau, \qquad (16)$$

где эмпирический коэффициент $\boldsymbol{\lambda_2}$ (для ПЭВП $\boldsymbol{\lambda_2=0,882}$), а функции $\boldsymbol{K(\tau)}$ и $\boldsymbol{B(\tau)}$ определены при проведении статических испытаний. Расчетные деформации ползучести ПЭВП показаны на рис.4-6. Расчет дает относительно удовлетворительное описание ползучести в случае нестационарного циклического нагружения. Исключения имеют место, когда интенсивность деформаций ползучести достигает зоны предельных деформаций на первых ступенях нагружения. Принципы построения наиболее распространенных уравнений механических состояний, в том числе и предложенных в данной работе, изложены в учебном пособии [29]. Изложенные в работе методы расчётов на ползучесть могут быть использованы при оценке прочности водоводов и адаптированы для моделирования процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном [30-32].

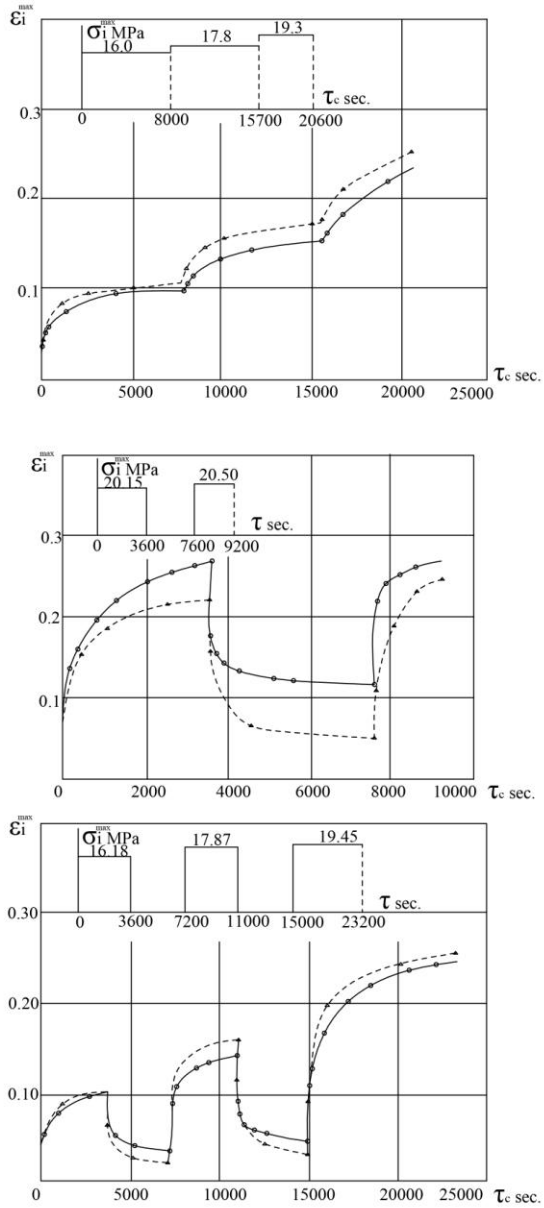

Рисунок 4. Режим нестационарного нагружения с частотой 5 Гц и кривые ползучести ПЭВП при соотношении ($n=\frac{\sigma_x}{\sigma_\theta}=1$): 0 – опытные и $\Delta-$ расчетные кривые

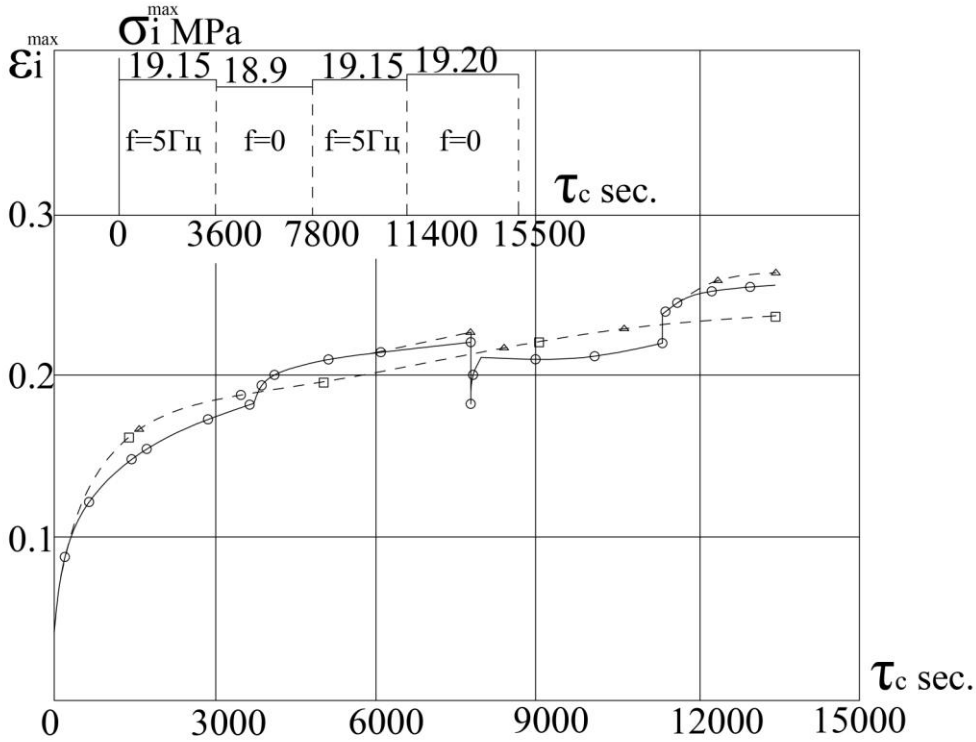

Рисунок 5. Режим смешанного нагружения и кривые ползучести ПЭВП:
0 – опытные и □, Δ – расчетные кривые

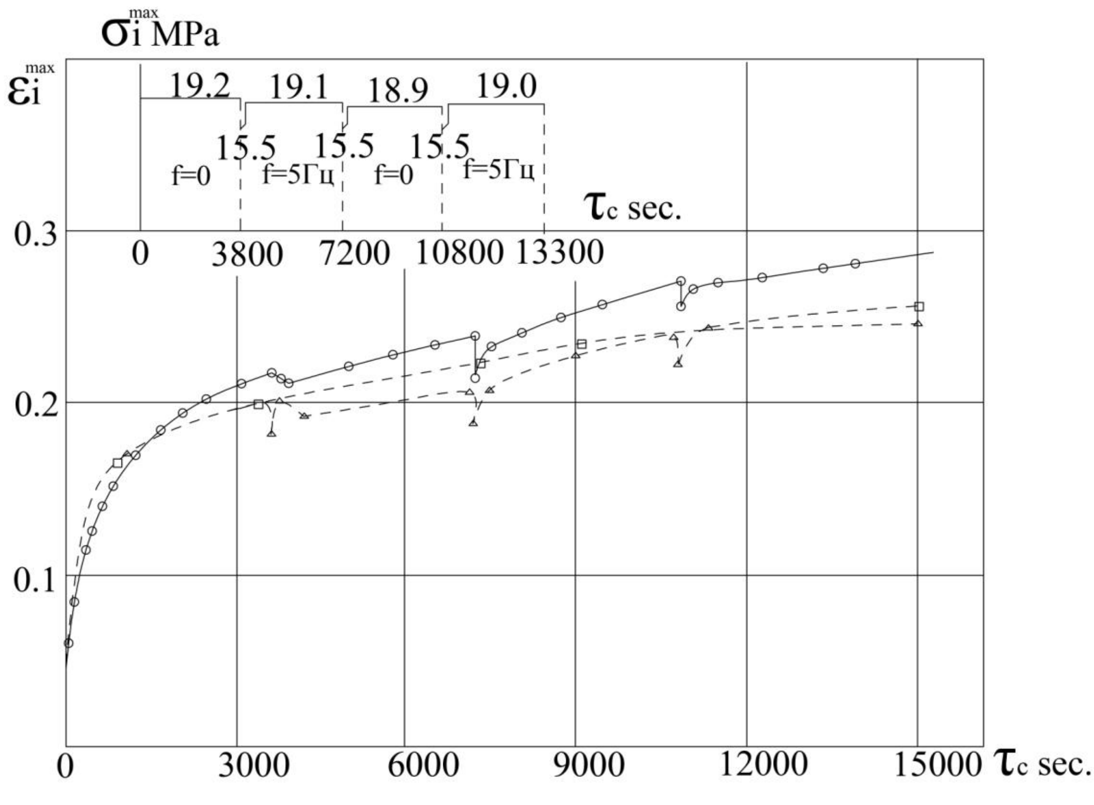

Рисунок 6. Режим смешанного нагружения и кривые ползучести ПЭВП:
0 – опытные и □, Δ – расчетные кривые

Заключение

1. Деформации ползучести полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) при статическом стационарном и нестационарном нагружении удовлетворительно описываются уравнением механических состояний, учитывающим мгновенноупругую, вязкоупругую, мгновеннопластическую и вязкопластическую составляющие деформации с использованием условия постоянства объёма, условия подобия девиаторов напряжений и деформаций, а также при введении параметров, являющихся функциями вида девиатора напряжений.

2. Применение подобного уравнения, построенного на основании результатов статистических испытаний, к режиму циклического нагружения дает несколько заниженное значение расчетных деформаций ползучести. Предложена эмпирическая поправка к уравнению механических состояний.

3. Уравнение механических состояний допускает учет функциональных параметров, зависящих от времени старения и меры поврежденности при длительном нагружении.

Литература

[1]. Павлов П.А. Механические состояния и прочность материалов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 176 с.

[2]. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.

[3]. Айбиндер С.Б., Тюнина Э.Л., Цируле К.И. Свойства полимеров при различных напряженных состояниях. М.: Химия, 1981. 232 с.

[4]. Бугаков И.И. Ползучесть полимерных материалов. М.: Наука, 1973. 288 с.

[5]. Бартенев Г.И. Прочность и механизмы разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.

[6]. Гольдман А.Я. Прочность конструкционных пластмасс. Л.: Машиностроение, 1979. 320 с.

[7]. Гольдман А.Я. Объёмная деформация пластмасс. Л.: Машиностроение, 1984. 232 с.

[8]. Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Л.: Химия, 1988. 272 с.

[9]. Илюшин А.А. Победря Б.Е. Основы математической теории вязкоупругости. М.: Наука, 1970. 280 с.

[10]. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов. М.: Наука, 1972,. 327 с.

[11]. Павлов П.А., Андреев А.В. Исследование ползучести фторопласта-4 в условиях плоского циклического напряженного состояния // Механика полимеров. 1976. №6. С.1099-1103.

[12]. Павлов П.А., Кондакова О.Н., Белан-Гайко В.Н. Ползучесть полиэтилена при сложном напряженном состоянии в усло-виях нестационарного нагружения // Механика композитных материалов. 1980. №5. С. 793-801.

[13]. Павлов П.А., Крутских Н.А. Феноменологическое описание и экспериментальное исследование деформационных процессов при сложном термомеханическом нагружении частично кристаллических материалов // Механика композитных материалов. 1984. №6. С. 974-979.

[14]. Павлов П.А., Яковлева Е.Л., Крутских Н.А. Аналитическое описание процессов деформирования и разрушения элементов конструкций из полимерных материалов // Труды ЛПИ. 1983. №393. С. 3-7.

[15]. Павлов П.А., Косов К.А. Сопротивление частично кристаллических полимерных материалов циклическому нагружению при плоском напряженном состоянии // Механика композитных материалов. 1986. №6. С. 978-986.

[16]. Белан-Гайко В.Н. Экспериментальное исследование деформируемой полимерных материалов при нестационарном пропорциональном нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1991. №8. С. 61-64.

[17]. Белан-Гайко В.Н. Экспериментальное исследование ползучести полимерного материала при пропорциональном нестационарном нагружении в условиях плоского напряженного состояния // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992. №1. С.105-109.

[18]. Шерстнев В.А., Гольдман А.Я. Установка для испытания полимерных материалов на усталость в условиях плоского напряженного состояния // Проблемы прочности. 1976. №12. С. 111-113.

[19]. Огородова Л.И. Установка для использования полимерных материалов в условиях плоского напряженного состояния при статическом и циклическом нагружении // Механика.: РЖ. 1979, №1096 деп.

[20]. Павлов П.А., Огородов Л.И. Изучение предельной деформации полукристаллических полимерных материалов при статическом и циклическом напряжении // Пластическое массы. 1988. №11. С. 27-29.

[21]. Огородов Л.И., Котягов Л.Ф., Курилович Н.Н. Деформирование полукристаллических полимерных материалов в усло-виях кратковременного нагружения // Научно-технические проблемы развития производства химических волокн в Бе-ларуси: Материалы третьей Белорусской научно-практической конференции. 2006. С. 329-333.

[22]. Павлов П.А., Огородов Л.И. Длительное сопротивление полимерных и композитных материалов с учетом многолетнего естественного старения // Механика композитных материалов. 1991. №4. С. 392-696.

[23]. Павлов П.А., Огородов Л.И. Длительное сопротивление материалов с наследственными свойствами // Длительное сопротивление конструкционных материалов и вопросы расчета элементов конструкций: Межвузовский сборник. 1991. С. 4-10.

[24]. Огородов. Л.И. Прогнозирование деформаций ползучести полиэтилена высокой плотности // Работоспособность ком-позиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов. 1985. С. 16-17.

[25]. Огородова Л.И. Использование уравнения механических состояний для описания процессов ползучести при ступенчатых режимах длительного нагружения // Работоспособность композиционных строительных материалов при воздействии эксплуатационных факторов. 1989. С. 99-103.

[26]. Огородов. Л.И., Огородова И.Л. Математическая модель деформационных процессов с реологическими свойствами при сложных режимах длительного нагружения // Информатизация процессов деформирования открытых систем на основе СУБД, САПР, ДСНИ и систем искусственного интеллекта: Материалы четвертой международной научно-технической конференции. 2007. С. 141-144.

[27]. Огородов Л.И. Ползучесть полукристалических полимерных материалов при плоском напряженном состоянии и циклическом нагружении // Деформирование и разрушения конструкционных элементов и материалов: Межвузовский сборник. 1998. С. 96-106.

[28]. Белан-Гайко В.Н., Огородова Л.И. Геометрическое подобие девиаторов напряжений и скоростей деформаций ползучести полимерных материалов в условиях линейного, сложного пропорционального и циклического режимов нагружения // Материалы десятой всероссийской конференции: Межвузовская наука – региону. 2012. С. 305-310.

[29]. Курилович Н.Н., Огородов Л.И. Элементы теории ползучести в примерах и задачах. Могилев:МТИ, 2000. 73 с.

[30]. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процессов разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5 (40). С.86-99

[31]. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процессов разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2014. №1 (45). С.23-41.

[32]. Неклюдова Е.В., Семенов А.С., Мельников Б.Е., Семенов С.Г. Экспериментальное исследования и конечно-элементный анализ упругих и прочностных свойств стекловолоконного композиционного материала // Инженерно-строительный журнал. 2014. №3(47). С.25-40.

The creep of high density polyethylene at various loading conditions

I.P. Nikolayeva[1], **L.I. Ogorodov**[2], **S.V. Krasikov**[3]

[1,2] *Saint-Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia,*

[3] *ZAO «Vologodsky Lesohimicheskii zavod, 1 Kanifolnaya st., Vologda, 160024, Russia.*

ARTICLE INFO	Article history	Keywords
Original research article	Received 08 December 2014 Accepted 29 December 2014	creep, polyethylene, mechanical equation of states, statics, cyclical, plane stress

ABSTRACT

The equation of mechanical states in the description of high density polyethylene creep under unsteady conditions of static and cyclic loading under plane stress state was built on the basis of experimental results. It takes into account momentary-elastic, viscoelastic, viscoplastic and momentary-plastic and strain components using the conditions of constant volume of material. Similarity conditions of stress and strain deviators apply them according to the equation. Introduction parameters are functions of the form of the stress deviator, as well accounted for in this equation. Obtained from the calculation of creep strain in stationary and non-stationary analytical and static loading is described satisfactorily by the proposed equation that follows from a comparison with the experimental data.

1 *Corresponding author:*
+7 (921) 305 7062, inna4i4n@mail.ru (Inna Pavlovna Nikolayeva, Ph.D., Associate Professor)
2 +7 (812) 552 6303, L.ogorodov@mail.ru (Leonid Ivanovich Ogorodov, Ph.D., Associate Professor)
3 +7 (8172) 716-2601, Serezhka@mail.ru (Sergey Valerjevich Krasikov. Chief)

References

[1]. Pavlov P.A. *Mekhanicheskiye sostoyaniya i prochnost materialov.* [Mechanical condition and strength of materials] L.: *Izd-vo LGU*, 1980. 176 p. (rus)

[2]. Pavlov P.A. *Osnovy inzhenernykh raschetov elementov mashin na ustalost i dlitelnuyu prochnost*. [Fundamentals of engineering calculations of machine elements fatigue and long-term strength] L.: *Mashinostroyeniye*, 1988. 252 p. (rus)

[3]. Aybinder S.B., Tyunina E.L., Tsirule K.I. *Svoystva polimerov pri razlichnykh napryazhennykh sostoyaniyakh* [Properties of polymers in different states of stress] M.: *Khimiya*, 1981. 232 p. (rus)

[4]. Bugakov I.I. *Polzuchest polimernykh materialov* [Creep of polymeric materials] M.: *Nauka*, 1973. 288 p. (rus)

[5]. Bartenev G.I. *Prochnost i mekhanizmy razrusheniya polimerov* [Strength and fracture mechanisms of polymers] M.: *Khimiya*, 1984. 280 p. (rus)

[6]. Goldman A.Ya. *Prochnost konstruktsionnykh plastmass* [Strength engineering plastics] L.: *Mashinostroyeniye*, 1979. 320 p. (rus)

[7]. Goldman A.Ya. *Obyemnaya deformatsiya plastmass* [Volumetric deformation of plastics] L.: *Mashinostroyeniye*, 1984. 232 p. (rus)

[8]. Goldman A.Ya. *Prognozirovaniye deformatsionno-prochnostnykh svoystv polimernykh i kompozitsionnykh materialov*. [Prediction of deformation and strength properties of polymeric and composite materials] L.: *Khimiya*, 1988. 272 p. (rus)

[9]. Ilyushin A.A. Pobedrya B.Ye. *Osnovy matematicheskoy teorii vyazkouprugosti*. M.: Nauka, 1970. 280 p. (rus)

[10]. Moskvitin V.V. *Soprotivleniye vyazkouprugikh materialov*. M.: Nauka, 1972. 327 p. (rus)

[11]. Pavlov P.A., Andreyev A.V. *Issledovaniye polzuchesti ftoroplasta-4 v usloviyakh ploskogo tsiklicheskogo napryazhennogo sostoyaniya* (1976) *Mekhanika polimerov*. Vol. 6. Pp.1099-1103. (rus)

[12]. Pavlov P.A., Kondakova O.N., Belan-Gayko V.N. *Polzuchest polietilena pri slozhnom napryazhennom sostoyanii v uslo-viyakh nestatsionarnogo nagruzheniya* (1980) *Mekhanika kompozitnykh materialov*. Vol. 5. Pp. 793-801. (rus)

[13]. Pavlov P.A., Krutskikh N.A. Fenomenologicheskoye opisaniye i eksperimentalnoye issledovaniye deformatsionnykh protsessov pri slozhnom termomekhanicheskom nagruzhenii chastichno kristallicheskikh materialov (1984) Mekhanika kompozitnykh materialov. Vol. 6. Pp. 974-979. (rus)

[14]. Pavlov P.A., Yakovleva Ye.L., Krutskikh N.A. Analiticheskoye opisaniye protsessov deformirovaniya i razrusheniya elementov konstruktsiy iz polimernykh materialov (1983) Trudy LPI. 1983. №393. S. 3-7. (rus)

[15]. Pavlov P.A., Kosov K.A. Soprotivleniye chastichno kristallicheskikh polimernykh materialov tsiklicheskomu nagruzheniyu pri ploskom napryazhennom sostoyanii (1986) Mekhanika kompozitnykh materialov. Vol. 6. Pp. 978-986. (rus)

[16]. Belan-Gayko V.N. Eksperimentalnoye issledovaniye deformiruyemoy polimernykh materialov pri nestatsionarnom proportsionalnom nagruzhenii v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya // Problemy prochnosti. 1991. Vol. 8. Pp. 61-64. (rus)

[17]. Belan-Gayko V.N. Eksperimentalnoye issledovaniye polzuchesti polimernogo materiala pri proportsionalnom nestatsionarnom nagruzhenii v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. 1992. Vol. 1. Pp.105-109. (rus)

[18]. Sherstnev V.A., Goldman A.Ya. Ustanovka dlya ispytaniya polimernykh materialov na ustalost v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya // Problemy prochnosti. 1976. №12. S. 111-113. (rus)

[19]. Ogorodova L.I. Ustanovka dlya ispolzovaniya polimernykh materialov v usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii // Mekhanika.: RZh. 1979, №1096 dep. (rus)

[20]. Pavlov P.A., Ogorodov L.I. Izucheniye predelnoy deformatsii polukristallicheskikh polimernykh materialov pri staticheskom i tsiklicheskom napryazhenii // Plasticheskoye massy. 1988. №11. S. 27-29. (rus)

[21]. Ogorodov L.I., Kotyagov L.F., Kurilovich N.N. Deformirovaniye polukristallicheskikh polimernykh materialov v uslo-viyakh kratkovremennogo nagruzheniya // Nauchno-tekhnicheskiye problemy razvitiya proizvodstva khimicheskikh volokn v Be-larusi: Materialy tretyey Belorusskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2006. S. 329-333. (rus)

[22]. Pavlov P.A., Ogorodov L.I. Dlitelnoye soprotivleniye polimernykh i kompozitnykh materialov s uchetom mnogoletnego yestestvennogo stareniya // Mekhanika kompozitnykh materialov. 1991. №4. S. 392-696. (rus)

[23]. Pavlov P.A., Ogorodov L.I. Dlitelnoye soprotivleniye materialov s nasledstvennymi svoystvami // Dlitelnoye soprotivleniye konstruktsionnykh materialov i voprosy rascheta elementov konstruktsiy: Mezhvuzovskiy sbornik. 1991. S. 4-10. (rus)

[24]. Ogorodov. L.I. Prognozirovaniye deformatsiy polzuchesti polietilena vysokoy plotnosti // Rabotosposobnost kompozitsionnykh stroitelnykh materialov v usloviyakh vozdeystviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov. 1985. S. 16-17. (rus)

[25]. Ogorodova L.I. Ispolzovaniye uravneniya mekhanicheskikh sostoyaniy dlya opisaniya protsessov polzuchesti pri stupenchatykh rezhimakh dlitelnogo nagruzheniya // Rabotosposobnost kompozitsionnykh stroitelnykh materialov pri vozdeystvii ekspluatatsionnykh faktorov. 1989. S. 99-103. (rus)

[26]. Ogorodov. L.I., Ogorodova I.L. Matematicheskaya model deformatsionnykh protsessov s reologicheskimi svoystvami pri slozhnykh rezhimakh dlitelnogo nagruzheniya // Informatizatsiya protsessov deformirovaniya otkrytykh sistem na osnove SUBD, SAPR, DSNI i sistem iskusstvennogo intellekta: Materialy chetvertoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2007. S. 141-144. (rus)

[27]. Ogorodov L.I. Polzuchest polukristalicheskikh polimernykh materialov pri ploskom napryazhennom sostoyanii i tsiklicheskom nagruzhenii // Deformirovaniye i razrusheniya konstruktsionnykh elementov i materialov: Mezhvuzovskiy sbornik. 1998. S. 96-106. (rus)

[28]. Belan-Gayko V.N., Ogorodova L.I. Geometricheskoye podobiye deviatorov napryazheniy i skorostey deformatsiy polzuchesti polimernykh materialov v usloviyakh lineynogo, slozhnogo proportsionalnogo i tsiklicheskogo rezhimov nagruzheniya // Materialy desyatoy vserossiyskoy konferentsii: Mezhvuzovskaya nauka – regionu. 2012. S. 305-310. (rus)

[29]. Kurilovich N.N., Ogorodov L.I. Elementy teorii polzuchesti v primerakh i zadachakh. Mogilev:MTI, 2000. 73 s. (rus)

[30]. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast 1. Modeli s uchetom nesploshnosti soyedineniya // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2013. №5 (40). S.86-99 (rus)

[31]. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast 2. Modeli bez ucheta nesploshnosti soyedineniya // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2014. №1 (45). S.23-41. (rus)

[32]. Neklyudova Ye.V., Semenov A.S., Melnikov B.Ye., Semenov S.G. Eksperementalnoye issledovaniya i konechno-elementnyy analiz uprugikh i prochnostnykh svoystv steklovolokonnogo kompozitsionnogo materiala // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2014. №3(47). S.25-40. (rus)