

УДК 539.376:678.5.004.12

## Прогнозирование процессов ползучести и релаксации напряжений пенопласта ПС-1 различной плотности

И. И. Ведерникова, А. И. Коршунов,  
Л. В. Поляков

*Описаны результаты исследований процессов ползучести и релаксации пенопласта ПС-1 трех плотностей (0,2, 0,4 и 0,6 г/см<sup>3</sup>) при различных уровнях начальных напряжений и деформаций сжатия и построение адекватной структурно-феноменологической модели этих процессов. Используя построенную математическую модель ползучести, выполнено прогнозирование данных процессов. Приведены расчеты прогнозирования ползучести и релаксации на срок 12,5 лет для пенопласта ПС-1 трех плотностей. Получены зависимости, позволяющие при проектировании конструкций сделать выбор плотности пенопласта ПС-1 в зависимости от расчетного напряжения сжатия и допускаемого значения деформации ползучести.*

Пенопласт марки ПС-1, плотность которого составляет от 0,1 до 0,7 г/см<sup>3</sup> в зависимости от назначения, является одним из наиболее широко распространенных неметаллических конструкционных материалов.

Для расчета конструкций, длительно находящихся под воздействием статических нагрузок, кроме физико-механических свойств необходимо иметь сведения о длительной ползучести и релаксации напряжений. Эти сведения можно было бы получить по данным прямых испытаний, если бы не ряд трудностей. Наиболее существенной из них является длительность исследуемых процессов. Скорость данных процессов на установившихся участках настолько мала, что исследование процессов ползучести и релаксации в реальном времени не удовлетворяет запросам практики. Поэтому экспериментаторам приходится прибегать к ускоренным методам испытаний и построению адекватных моделей изучаемых процессов.

Авторами [1, 2] построена структурно-феноменологическая модель ползучести полимерных и композиционных материалов на полимерной основе при одноосном сжатии. Модель описывает стадии неустановившейся и установившейся ползучести и может быть использована для прогнозирования процессов ползучести и релаксации напряжений на длительные сроки эксплуатации:

$$\dot{\varepsilon}_p = \left( a_1 \sigma + a_2 \sigma^2 \right) \left[ 1 + a_3 (\sigma - k) + a_4 (\sigma - k)^2 \right]; \quad (1)$$

$$\dot{k} = a_5 \dot{\varepsilon}_p \left( 1 - \frac{k}{\sigma} \right); \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_0 - E \varepsilon_p, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_p$  – деформация ползучести;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость деформации ползучести;  $k$  – напряжение сопро-

тивления субструктуры;  $\dot{k}$  – скорость напряжения сопротивления субструктуры;  $\sigma$  – текущее напряжение;  $\sigma_0$  – напряжение в начальный момент времени;  $E$  – модуль Юнга;  $a_1, a_2, \dots, a_5$  – параметры модели, подлежащие идентификации по экспериментальным данным на ползучесть и релаксацию напряжений.

Процедура идентификации модели ползучести (1)–(3) по опытным данным по исследованию ползучести и релаксации напряжений сводится к нахождению значений параметров модели из условия минимизации функционалов [3]:

$$J(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = \int_0^{\tau} [\varepsilon_p(t) - \bar{\varepsilon}_p(t)]^2 dt;$$

$$J(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = \int_0^{\tau} [\sigma(t) - \bar{\sigma}(t)]^2 dt,$$

где  $\varepsilon_p(t)$  и  $\bar{\varepsilon}_p(t)$  – рассчитанные по модели и опытные кривые ползучести для заданной функции  $\sigma(t)$ ;  $\tau$  – длительность эксперимента;  $\sigma(t)$  и  $\bar{\sigma}(t)$  – рассчитанные по модели и опытные кривые релаксации напряжений при фиксированном значении  $\varepsilon$ .

Испытания на ползучесть проводились на установке рычажного типа. Замер деформации производился с помощью индикатора часового типа с ценой деления, равной 0,01 мм. Испытания на релаксацию напряжений проводились на универсальной испытательной машине INSTRON модели 1185 через реверсор на сжатие в режиме поддержания постоянной деформации. При этом деформация образцов измерялась экстензометром, который закреплялся на нагружающем приспособлении.

В данной работе приведены результаты исследований ползучести и релаксации напряжений при одноосном сжатии при комнатной температуре пенопласта марки ПС-1 трех плотностей:

- 1) для плотности 0,2 г/см<sup>3</sup> – ползучесть при двух начальных напряжениях 1,9 и 3,2 Н/мм<sup>2</sup>;
- 2) для плотности 0,4 г/см<sup>3</sup> – релаксация при двух уровнях начальной деформации 0,83 и 1,25 % и ползучесть при двух уровнях начального напряжения 4,3 и 6,4 Н/мм<sup>2</sup>;
- 3) для плотности 0,6 г/см<sup>3</sup> – ползучесть при двух начальных напряжениях 3,2 и 4,8 Н/мм<sup>2</sup>.

Экспериментальные кривые ползучести и релаксации при сжатии пенопласта ПС-1 различной плотности приведены на рис. 1–4 для указанных выше начальных уровней деформации и напряжения. По полученным экспериментальным данным для пенопласта ПС-1 исследуемых плотностей выполнена идентификация параметров модели ползучести (1)–(3), по которым построены расчетные кривые ползучести и релаксации (см. рис. 1–4). Отклонения расчетных кривых от экспериментальных для пенопласта ПС-1 исследуемых плотностей составляют ~ 10 %, что не превышает разброса по физико-механическим свойствам для данного материала.

Показана адекватность построенной модели ползучести для рассматриваемого материала различной плотности, а именно, рассчитав параметры модели ползучести по экспериментальным данным при каком-то одном начальном условии ползучести или релаксации, можно выполнять расчет релаксации и ползучести при любых других начальных условиях (кривые показаны пунктирными линиями на рис. 1–4).

Используя рассчитанные параметры построенной модели ползучести для пенопласта ПС-1 различной плотности, сделано прогнозирование процессов ползучести и релаксации на времена, большие времен их экспериментального определения, а именно на 10 лет, для различных начальных уровней деформации и напряжений сжатия (рис. 5–8).

Следует отметить, что начальные уровни напряжений и деформаций сжатия в реальных конструкциях из пенопластов исследуемых плотностей значительно ниже по сравнению с исследуемыми экспериментальными значениями напряжений и деформаций сжатия.

На рис. 9 для пенопласта ПС-1 показана графическая зависимость прогнозируемого изменения деформации ползучести на 10 лет от плотности при различных начальных напряжениях.

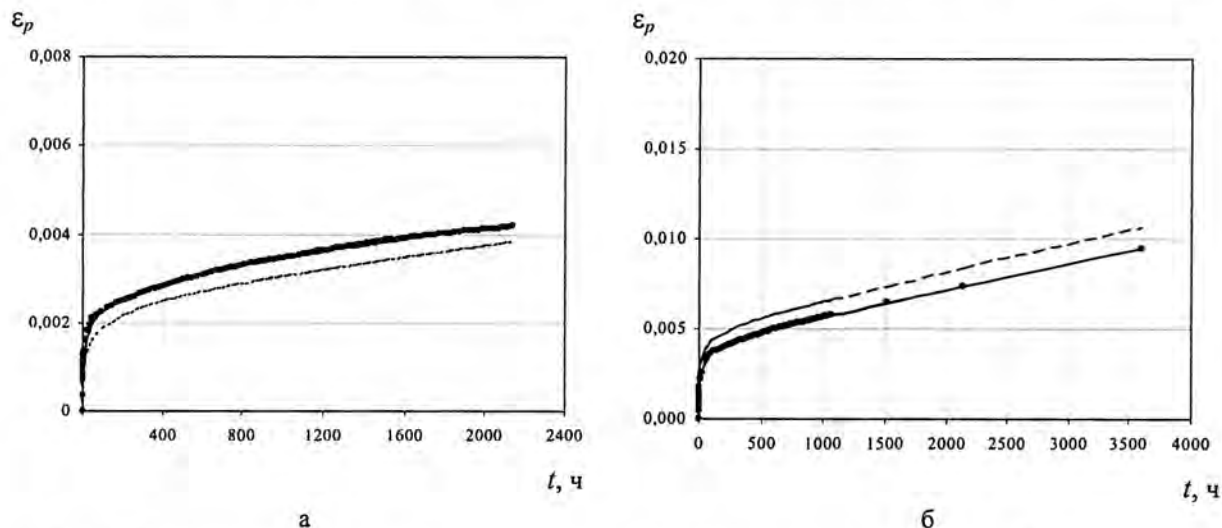


Рис. 1. Экспериментальные данные и расчетные кривые ползучести для пенопласта ПС-1 плотностью  $0,2 \text{ г/см}^3$  при начальных напряжениях  $1,9$  (а) и  $3,2 \text{ Н/мм}^2$  (б): ● – экспериментальные данные по ползучести; — — — — расчетная кривая ползучести по параметрам рассматриваемого уровня напряжения; — — — — расчетная кривая ползучести по параметрам другого уровня напряжения

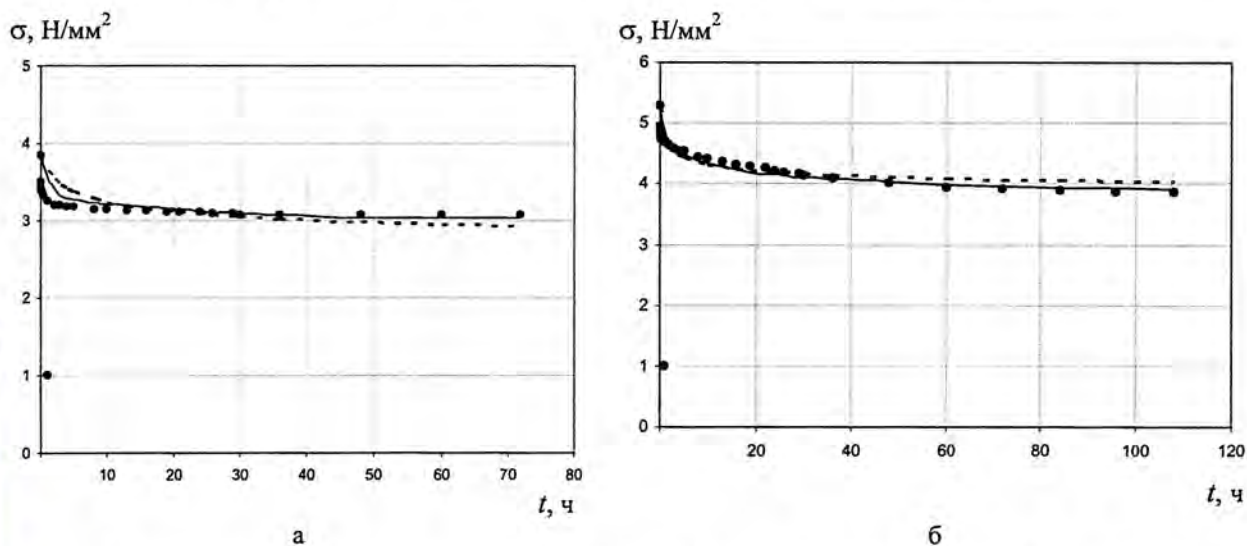


Рис. 2. Экспериментальные данные и расчетные кривые релаксации для пенопласта ПС-1 плотностью  $0,4 \text{ г/см}^3$  при начальной деформации  $0,83$  (а) и  $1,25 \%$  (б): ● – экспериментальные данные по релаксации; — — — — расчетная кривая релаксации по параметрам рассматриваемого уровня деформации; — — — — расчетная кривая релаксации по параметрам другого уровня деформации

Из рис. 9 можно увидеть, что для любой плотности исследуемого материала при увеличении начального напряжения сжатия значение деформации ползучести увеличивается. Видно, что для пенопласта ПС-1 чем выше плотность, тем деформация ползучести через 10 лет будет меньше при любых начальных напряжениях сжатия.

Полученные зависимости позволяют при проектировании конструкций сделать подбор плотности пенопласта ПС-1 в зависимости от расчетного напряжения сжатия и допускаемого значения деформации ползучести.

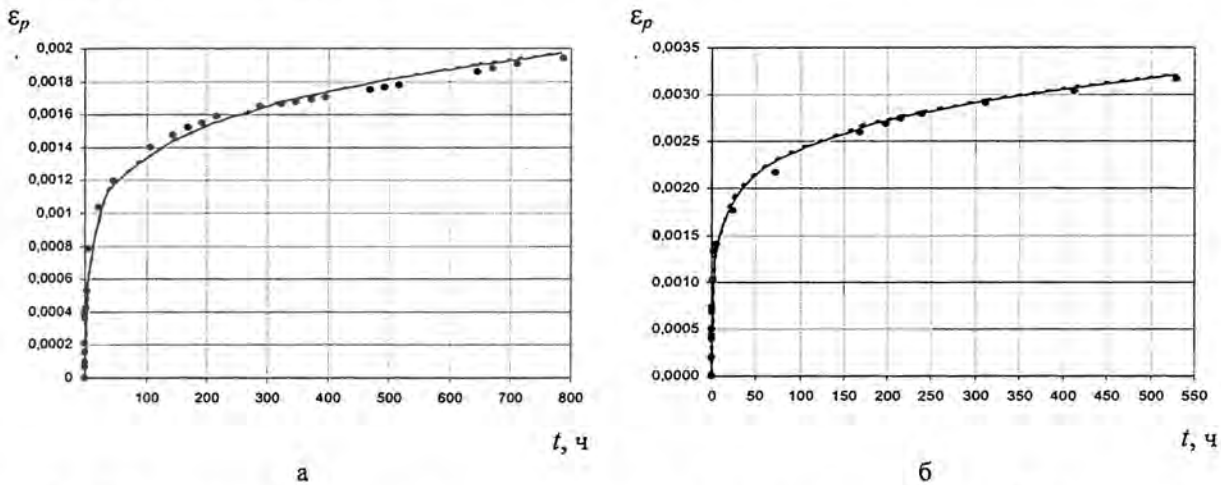


Рис. 3. Экспериментальные данные и расчетные кривые ползучести для пенопласта ПС-1 плотностью  $0,4 \text{ г/см}^3$  при начальных напряжениях  $4,3$  (а) и  $6,4 \text{ Н/мм}^2$  (б): ● – экспериментальные данные по ползучести; — — — расчетная кривая ползучести по параметрам рассматриваемого уровня напряжения; — — — расчетная кривая ползучести по параметрам другого уровня напряжения

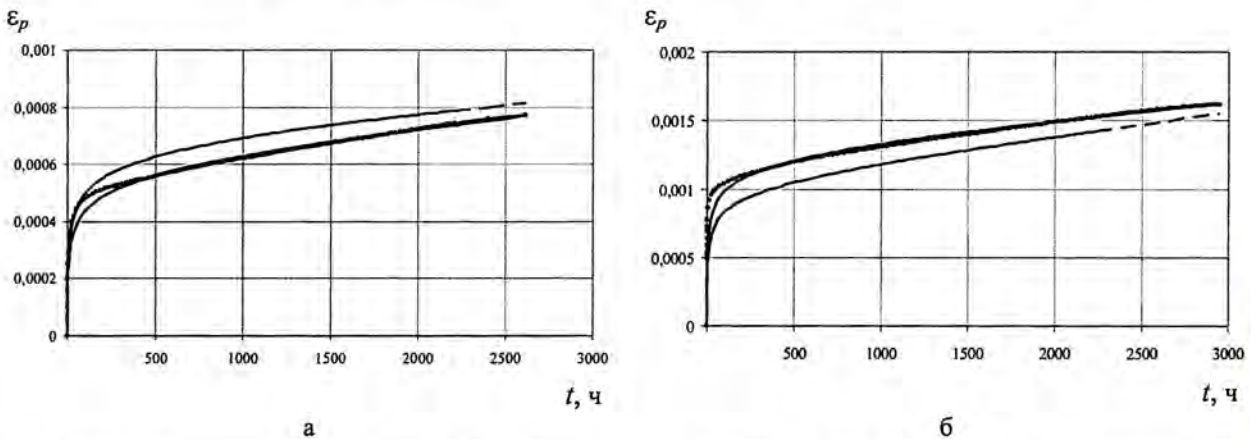


Рис. 4. Экспериментальные данные и расчетные кривые ползучести для пенопласта ПС-1 плотностью  $0,6 \text{ г/см}^3$  при начальных напряжениях  $3,2$  (а) и  $4,8 \text{ Н/мм}^2$  (б): ● – экспериментальные данные по ползучести; — — — расчетная кривая ползучести по параметрам рассматриваемого уровня напряжения; — — — расчетная кривая ползучести по параметрам другого уровня напряжения

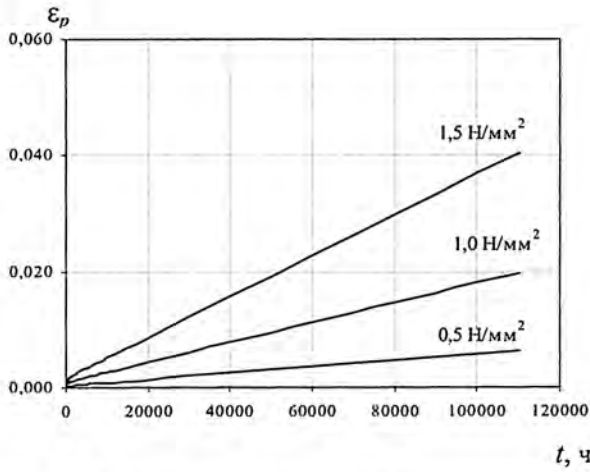


Рис. 5. Прогнозируемые кривые ползучести при сжатии пенопласта ПС-1 плотностью 0,2 г/см<sup>3</sup>

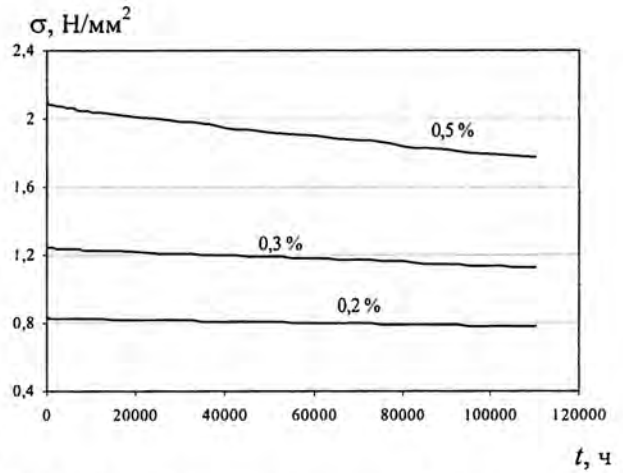


Рис. 6. Кривые прогноза релаксации напряжения при сжатии пенопласта ПС-1 плотностью 0,4 г/см<sup>3</sup>

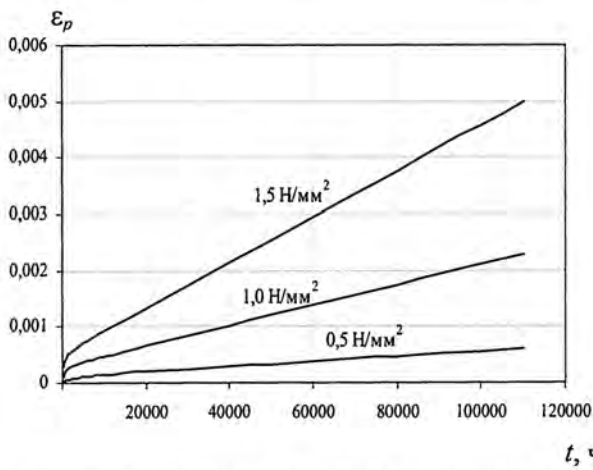


Рис. 7. Прогнозируемые кривые ползучести при сжатии пенопласта ПС-1 плотностью 0,4 г/см<sup>3</sup>

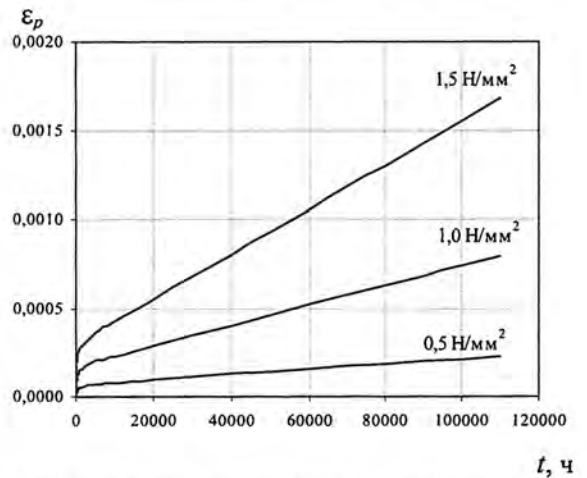


Рис. 8. Прогнозируемые кривые ползучести при сжатии пенопласта ПС-1 плотностью 0,6 г/см<sup>3</sup>

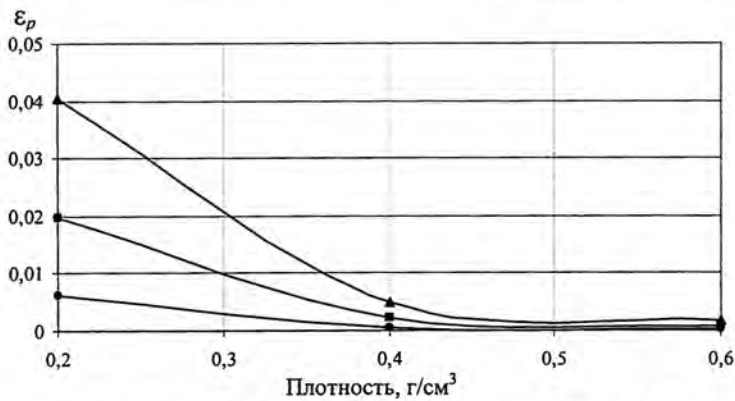


Рис. 9. Зависимость прогнозируемой деформации ползучести на 10 лет от плотности для пенопласта ПС-1: —●—  $\sigma_0 = 0,5 \text{ Н/мм}^2$ ; —■—  $\sigma_0 = 1,0 \text{ Н/мм}^2$ ; —▲—  $\sigma_0 = 1,5 \text{ Н/мм}^2$

## Заключение

Показана возможность использования структурно-феноменологической модели ползучести для адекватного описания процессов ползучести и релаксации при любых уровнях начальных напряжений и деформаций для пенопласта ПС-1 различной плотности. При этом отклонения расчетных кривых от экспериментальных составляют ~ 10 %, что не превышает разброса по физико-механическим свойствам для данного материала.

Используя построенную структурно-феноменологическую модель ползучести, можно прогнозировать процессы ползучести и релаксации на времена, большие, чем времена их экспериментального определения. Для пенопласта ПС-1 выполнен прогноз деформации ползучести за 10 лет в зависимости от плотности и уровня начального напряжения сжатия, позволяющий при проектировании конструкций из данного материала осуществлять выбор плотности материала в зависимости от величины расчетного напряжения сжатия и допустимого значения деформации ползучести.

## Список литературы

1. Ведерникова И. И., Коршунов А. И., Поляков Л. В. Построение модели процессов релаксации и ползучести методами идентификации // Новые промышленные технологии. 2001. Вып. 1 (300). С. 10–12.
2. Ведерникова И. И., Коршунов А. И., Поляков Л. В., Коновалов А. В. Усовершенствованная структурно-феноменологическая модель ползучести композиционного материала // Сб. докладов научно-технической конференции «Молодежь в науке», г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002 г. С. 542–544.
3. Уржумцев Ю. С. Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига, Зинатне, 1975.

## Predicting of Creeping and Stress Relaxation Processes of PS-1 foam Plastic Featuring Optional Densities

I. I. Vedernikova, A. I. Korshunov, L. V. Polyakov

*The presents the results of studies of creeping and relaxation of PS-1 foam plastic featuring three densities (0.2, 0.4 and 0.6 g/cm<sup>3</sup>) under optional initial stresses and compressive deformation. The adequate structural-phenomenological model of these processes was designed. Using the mathematical model of creeping the above processes were predicted. Calculations of predictable creeping and relaxation for 12,5 years period for PS-1 foam plastic featuring three densities were done. As a result the dependencies permitting to select PS-1 foam plastic density depending on the value of calculated compression and the admissible creeping deformation were specified.*