

6
А48

2011

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР
Ленинградский ордена Ленина политехнический институт
имени М. И. Калинина

На правах рукописи

Л. А. САРКИСОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ
ИЗ КАПРОЛОНА ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Диссертация написана на русском языке

(01.022 — сопротивление материалов и строительная механика)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1 9 7 1

f

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

Л. А. САРКИСОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ КАПРОЛОНА
ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Диссертация написана на русском языке

(01.022 - сопротивление материалов и
строительная механика)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1971



В В Е Д Е Н И Е

Среди разнообразных полимерных материалов, применяемых в современной технике, особое место занимает группа различных полиамидных смол (капрон, капролон, полиамид П-68 и др.). Благодаря ряду ценных физико-механических свойств эти материалы не только успешно конкурируют с металлами, но и, что особенно важно, являются базой для создания новых, более совершенных и рациональных конструкций. В связи с этим приобретает перво-степенное значение разработка инженерных методов расчета конструкционных элементов из таких пластмасс на прочность, жесткость и устойчивость. При этом необходимо иметь в виду, что полиамиды, как и все синтетические материалы, относятся к рео-новным материалам. Их поведение в конструкциях существенно зависит от температуры и времени работы под нагрузкой.

Исследование прочности и деформативности полиамидов при простейших видах деформации рассмотрено в работах следующих авторов: Н.И. Антроповой, Д.Ф. Бабилова, К.Н. Власовой, И.П. Землякова, М.А. Колтунова, В.А. Шерстнева и др. . Что же касается исследования устойчивости стержней из таких пластмасс с учетом их ползучести, то этот вопрос оставался неисследованным.

Цель настоящей работы — решить экспериментально и теоретически задачу устойчивости при ползучести центрально сжатых стержней из капролона в условиях нормальной и повышенных температур.

Капролон по сравнению с другими полиамидными смолами обладает наиболее высокими механическими характеристиками прочности, что делает его наиболее перспективным для использования в качестве конструкционного материала.

В первой главе приводится критический обзор известной в этой области знания литературы и делается вывод о необходимо-

сти проведения исследований по выбранной в диссертации теме.

Теория устойчивости равновесия элементов конструкций (стержни, пластинки, оболочки) берет свое начало почти с момента зарождения строительной механики как науки. На протяжении последних двух столетий эта область знания непрерывно развивается и совершенствуется в трудах многочисленных исследователей. Ей посвящено много книг и монографий. Вместе с тем такие специальные вопросы, как вопросы устойчивости конструктивных элементов с учетом ползучести их материала, стали изучаться совсем недавно.

Впервые влияние ползучести материала стержня на устойчивость его равновесия было теоретически исследовано в известных работах А.Р.Ржаницына (1946г.). Позже за рубежом Дж.Марин (1947г.) и А.Фрейденталь (1950г.) выполнили исследования на аналогичную тему. В дальнейшем как в нашей стране, так и за рубежом появился целый ряд работ следующих авторов: Ю.Н.Работнова, С.А.Шестерикова, В.И.Розенблюма, А.С.Вольмира, Л.М.Куршина, Г.В.Иванова, Г.С.Глушкова, В.Ф.Воробьева, В.И.Ванько, А.М.Локошенко, Дж.Кемпнер, Г.Джерард, Н.Хофф, Ф.Шенли, Ф.Одквист, В.Джасман, Ф.Филд и др. Эти работы относятся к исследованиям устойчивости при ползучести стержней из традиционных технических материалов (металлы, их сплавы, бетон и др.). Число исследований, выполненных применительно к стержням из полимерных материалов, весьма ограничено. Следует назвать работу В.И.Андреева (1968г.), который впервые рассмотрел подобную задачу для стержней из эпоксидной смолы ЭДТ-10. Е.Гаубе и Г.Менгес также провели экспериментальное исследование продольного изгиба стержней из жесткого полиэтилена при ползучести.

На основании выполненного обзора работ, посвященных вопросам устойчивости сжатых стержней при ползучести, можно сделать следующие выводы:

1. Потеря устойчивости стержня при ползучести наступает не мгновенно, а через определенный промежуток времени (критическое время). При этом нагрузка, сжимающая стержень, остается всегда меньше эйлеровой критической силы.

2. Величина критического времени зависит от нагрузки,

гибкости стержня, первоначального отклонения его оси от прямой линейной формы и реологических свойств материала. Зависимость критического времени от всех вышеперечисленных факторов устанавливается с помощью различных критериев устойчивости при ползучести (критерий критических деформаций Джерарда, квазистатический критерий Работнова-Шестерикова, критерий касательного модуля Шенли, критерий начальных несовершенств Розенблюма, Одквиста, Хоффа и др.).

3. Процесс потери устойчивости при ползучести стержней из полимерных материалов имеет свои качественные особенности по сравнению со стержнями из металлов. Если процесс ползучести металлов принято описывать уравнениями теории упрочнения, то процесс ползучести полимеров ближе всего подчиняется уравнениям теории старения.

4. Известные немногочисленные экспериментальные исследования потери устойчивости стержней при ползучести относятся в основном к металлическим стержням. Для стержней из полимерных материалов такие исследования только начинаются.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию устойчивости при ползучести центрально сжатых стержней из капролона. Испытания производились на специально сконструированной для этой цели установке. Установка состоит из ряда однотипных секций, в которых монтируются реверсоры, позволяющие проводить одновременно длительные испытания целой партии образцов (до 20 шт.) при различных уровнях начальных напряжений, температурах внешней среды и способах закрепления концов стержней. Прогибы среднего сечения и продольные деформации образца измерялись с помощью индикаторов (цена деления 0,001 мм). Схема реверсора приводится на рис.1 и не требует специальных пояснений.

Предназначенные для основных испытаний образцы вырезались из капролонового блока (1300x400x250 мм), после чего подвергались механической обработке на строгальном станке. Материал блока отвечал техническим условиям МРТУ-6-03-988-66. Образцы имели вид полос постоянного прямоугольного сечения шириной

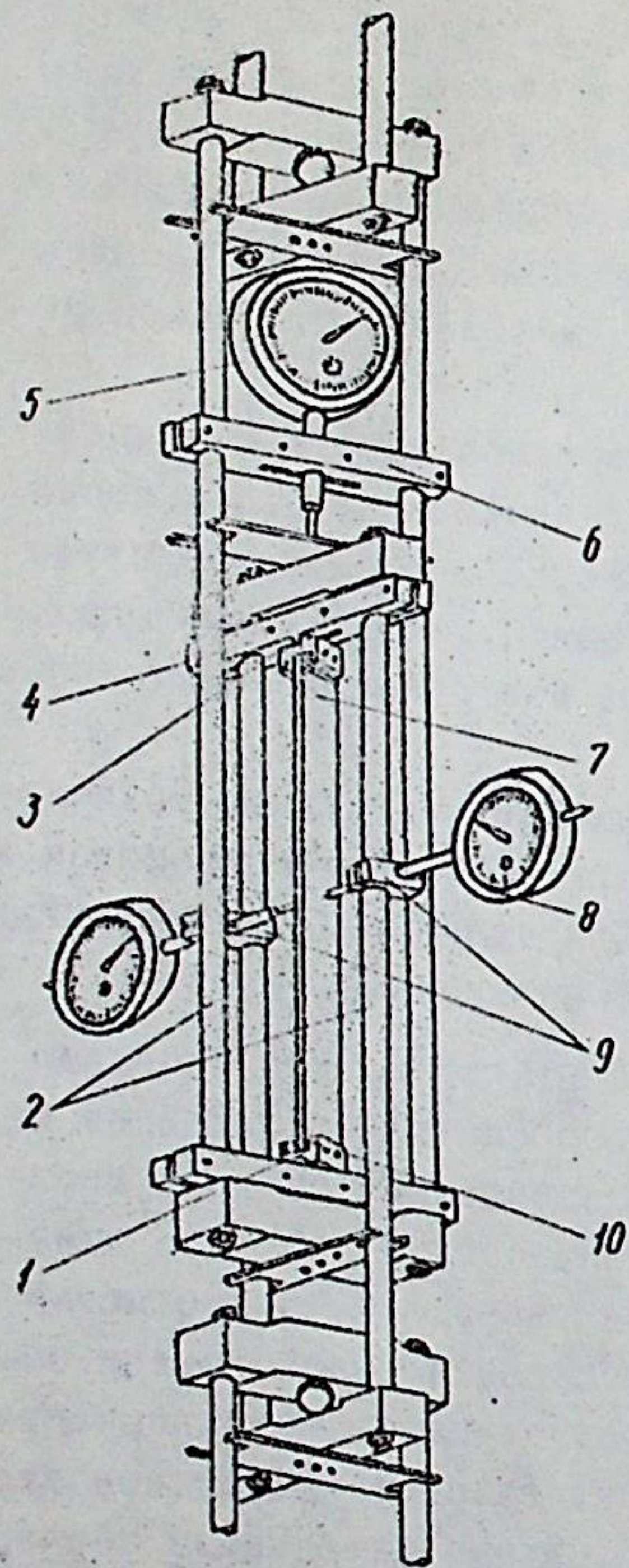


Рис. 1.

Длина образцов была различной и составляла 260, 225, 180, 132, 110, 86 мм, что позволило (в зависимости от способа закрепления концов) варьировать их гибкость в достаточно широком диапазоне от 150 до 26. Все образцы перед испытанием специально просушивались в термостате при температуре $+90^{\circ}\text{C}$. После просушки их влажность достигала 0,5-0,8%. Длительным испытаниям образцов на устойчивость предшествовали кратковременные испытания, в результате которых определялось значение мгновенной (эйлеровой) критической силы.

Основные длительные испытания стержней различной гибкости проводились при нормальной (20°C) и повышенных (40 и 60°C) температурах. Программа длительных испытаний предусматривала определение численных значений критического времени для образцов различной гибкости λ в зависимости от сжимающих стержень начальных напряжений и параметра $\alpha = \frac{P}{P_c}$, величина которого изменялась в интервале от 0,8- до 0,3. Продолжительность длительных испытаний зависела от этого параметра и составляла от 10 до 10^4 часов. Изучалось также влияние на величину критического времени способа закрепления концов образца и начального отклонения его оси от прямолинейной формы. Все испытания как при нормальной, так и при повышенных температурах (в термостате) проводились по единой методике испытаний. Первые отсчеты снимались сразу после нагружения, вторые через 2 минуты, третьи

$b = 25$ мм и высотой $h = 8$ мм.

через час, затем с промежутком 5 и 12 часов и далее через равные промежутки времени в зависимости от продолжительности испытания.

Результаты длительных испытаний показали:

1. Поведение сжатого постоянной силой карболонового стержня до момента потери им устойчивости характеризуется непрерывным во времени ростом прогибов. В момент потери стержнем устойчивости наблюдается резкий рост этих прогибов.

2. Критическое время весьма чувствительно к величине начального сжимающего напряжения σ . Так при $\sigma = 0,8 \sigma_c$ оно равняется 15-20 часам, а при $\sigma = 0,5 \sigma_c$ составляет около 2000 часов. Для стержней гибкостью $\lambda > 50$ величина критического времени $t_{кр}$ при фиксированном значении α практически не зависит от гибкости. Зависимость критического времени от параметра α представлена на рис. 2 (в координатах $\lg t$, α). Графики построены для стержней гибкостью $\lambda > 50$ при нормальной и повышенных температурах. При $\lambda < 50$ величина $t_{кр}$ зависит не только от параметра α , но и от гибкости λ (точки в виде кружков. См. рис. 4).

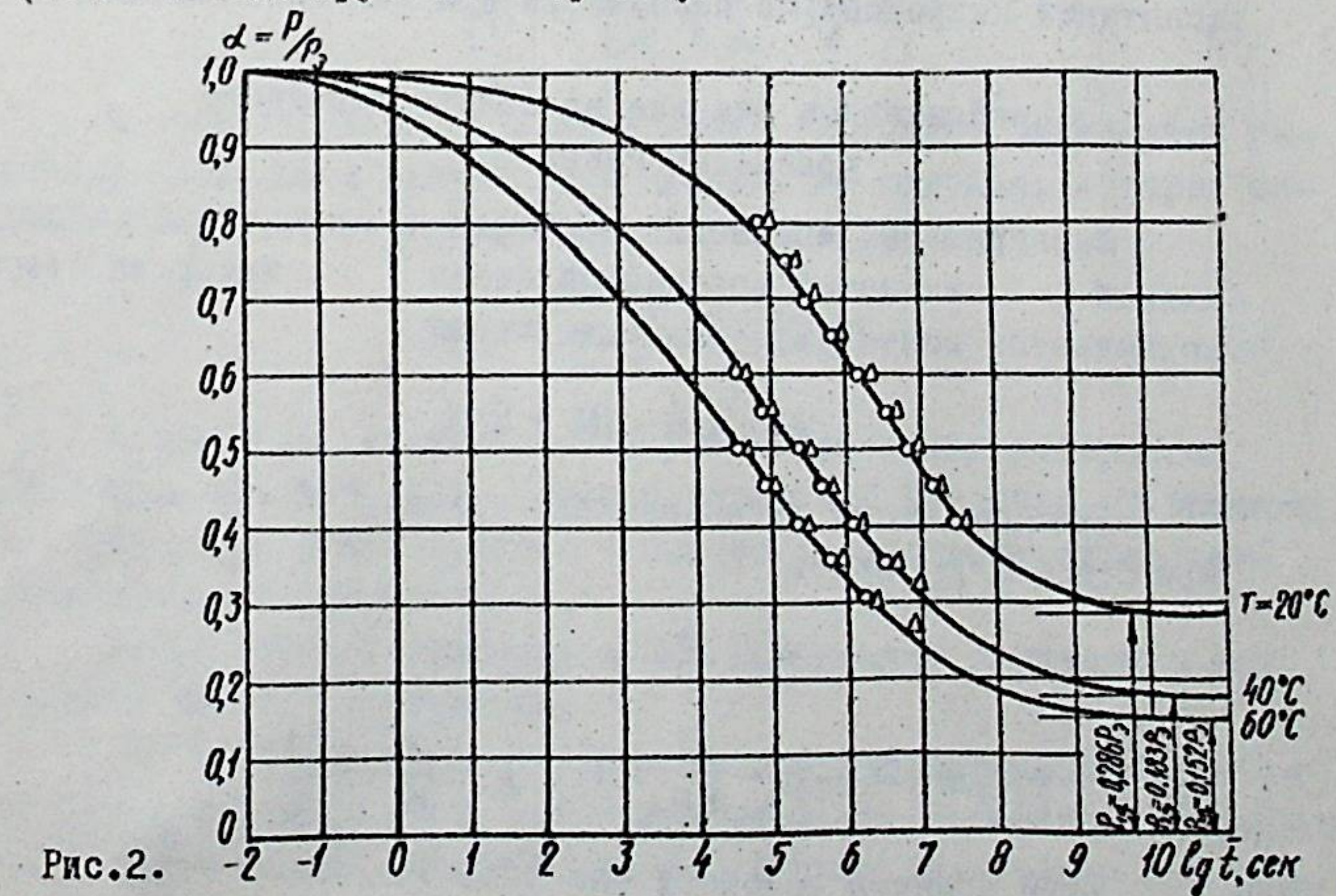


Рис. 2.

3. Величина критического времени уменьшается с увеличением начального (сразу после нагружения) прогиба стержня $f(0)$. Если условно за единицу принять критическое время для стержня с начальным прогибом $f(0) = 0,01h$, то при $f(0) = 0,02h$ оно уменьшается до 0,8, а при $f(0) = 0,1h$ - до 0,25. Также уменьшается критическое время и при повышении температуры. Как видно из рис.2, при одном и том же значении параметра λ величина $t_{кр}$ при температурах 40°C и 60°C на 1-2 порядка меньше, чем при температуре 20°C .

4. Способы закрепления концов образца (шарнирное, жесткое, смешанное) не оказывают влияния на результаты длительных испытаний.

В третьей главе дано приближенное решение задачи от устойчивости при ползучести центрально сжатого капролонового прямолинейного стержня в двух вариантах: на основе линейного (первое приближение) и нелинейного уравнений связи. При этом в обоих решениях для приближенного определения величины критического времени используются результаты обычных длительных испытаний капролона на ползучесть при линейном сжатии.

Приближенное решение на основе линейного уравнения связи

Шарнирно закрепленный по концам прямолинейный стержень длиной l сжимается постоянной силой P . Материал стержня подчиняется линейному уравнению связи:

$$\sigma + n\dot{\sigma} = H\varepsilon + En\dot{\varepsilon} \quad (1)$$

Решение этого уравнения для случая $\sigma = const.$ при $\varepsilon(0) = \sigma/E$ будет:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K\sigma\varphi(t), \quad (2)$$

где $\varphi(t) = 1 - \exp(-\frac{H}{En}t)$, $K = \frac{1}{H} - \frac{1}{E}$.

Если принять гипотезу плоских сечений $\varepsilon = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \cdot z$,

то уравнение кривой, по которой с течением времени будет искривляться стержень, запишется в виде:

$$EJ \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial t} + [1 + EK\varphi(t)] P \frac{\partial v}{\partial t} + EK \frac{d\varphi(t)}{dt} P v = 0. \quad (3)$$

Далее, приняв искривленную ось стержня в форме синусоиды:

$$v = [f(0) + f(t)] \sin \frac{\pi x}{l} \quad (4)$$

где $f(0)$ и $f(t)$ - начальный и дополнительный за время t прогиб среднего сечения, из уравнения (3) можно определить скорость нарастания прогиба $\dot{f}(t)$ в среднем сечении стержня:

$$\dot{f}(t) = \frac{[f(0) + f(t)] EK \dot{\varphi}(t)}{\frac{P}{E} - [1 + EK\varphi(t)]}$$

Критическое состояние стержня наступит, когда

$$\frac{P}{E} - [1 + EK\varphi(t)] = 0.$$

Отсюда, обозначив $\frac{P}{E} = \lambda$, получим

$$\varphi(t) = \frac{1}{EK} (\lambda - 1) \quad (5)$$

В соответствии с (5) из решения (2) можно определить величину продольной критической деформации стержня, которая получается равной эйлеровой критической деформации

$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma}{E} \frac{1}{\lambda} = \varepsilon(0) \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

Условие (6) отвечает критерию критических деформаций Джерарда, который, как показали ранее А.П.Кузнецов, В.Джасман и Ф.Филд, для металлических стержней удовлетворительно подтверждается экспериментами.

Аналогичное решение в случае повышенных температур приводит к тем же результатам.

Для приближенного определения критического времени воспользуемся результатами обычных длительных испытаний капролона на ползучесть при линейном сжатии. Кривая ползучести при нор-

нальной температуре в обобщенных координатах $\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon(t)}{\epsilon(0)}$ и t представлена на рис.3. Величина критического времени $t_{кр}$ по обобщенной кривой ползучести может быть найдена по значению параметра $\bar{\epsilon} = \epsilon_{кр}/\epsilon(0)$, который при заданном α вычисляется на основании (6).

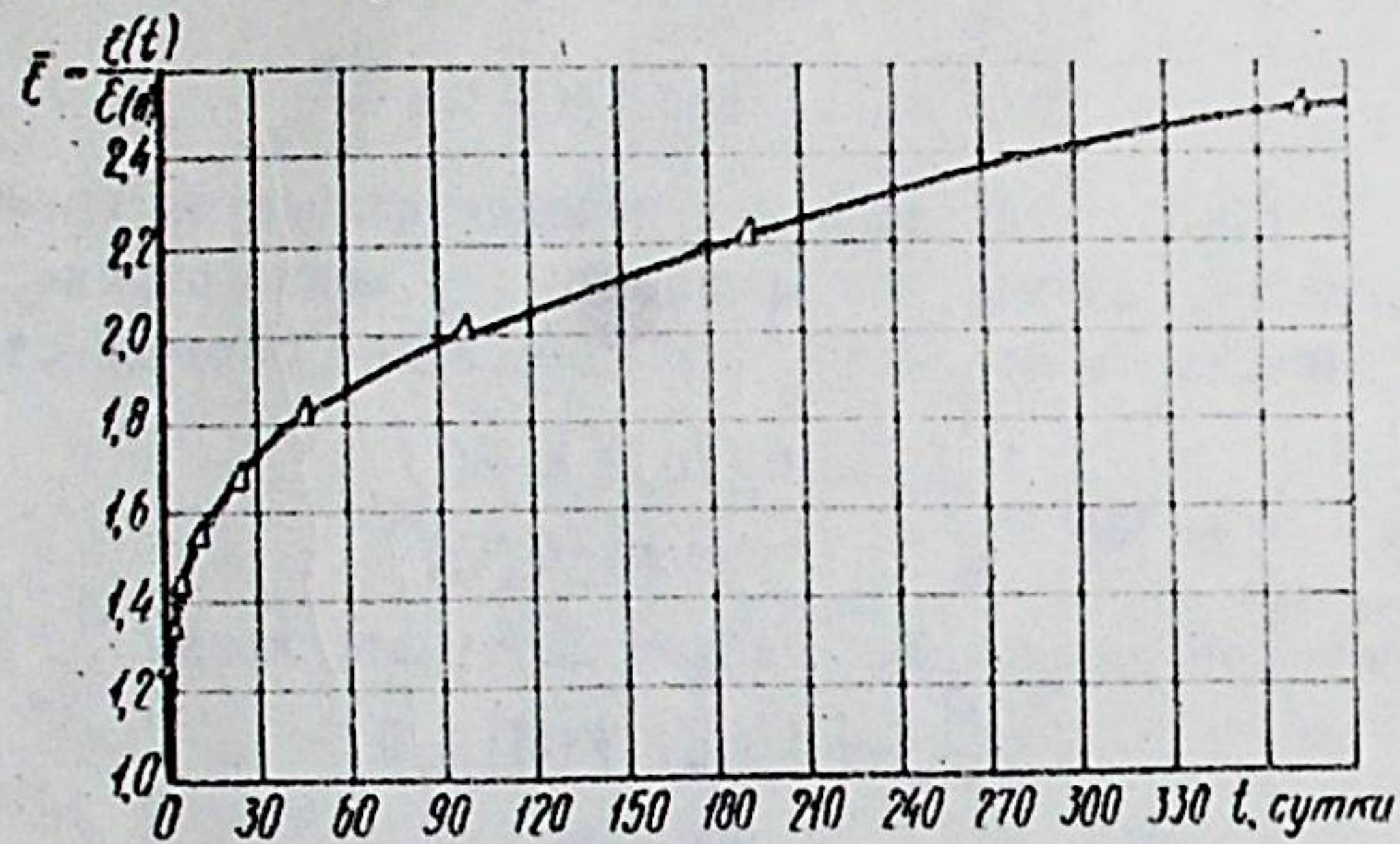


Рис. 3.

Результаты, полученные с помощью такого упрощенного способа определения критического времени, сравнивались с опытными данными (рис.2). Сравнение (треугольники на рис.2 и 3) показало, что предложенный способ для стержней гибкостью $\lambda > 50$ приводит к величине расхождения с опытными данными порядка 25%.

Упрощенный способ определения критического времени полностью пригоден и в случае повышенных температур. При этом величину $t_{кр}$ следует определять по обобщенным кривым ползучести при повышенных температурах.

Приближенное решение на основе нелинейного уравнения связи

Принимается, что материал карболонового стержня подчиняется уравнению связи в форме:

$$\epsilon(t) = \epsilon(0) + \rho = C \left[1 + \frac{\theta}{C} \varphi(t) \right] \text{sh} \lambda \Delta \sigma \quad (7)$$

х/Бабилов Д.Ф. Изучение статического сопротивления полиамидов при различном исходном состоянии и режиме нагружения. Автореферат канд. дисс. ЛПИ им. М.И.Калинина, 1968.

где ρ - деформация ползучести.

Входящие в него постоянные имеют значения:

$$A = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кг}; \quad B = 4,5 \cdot 10^{-2}; \quad C = 3,5 \cdot 10^{-2}.$$

Целесообразно при решении такой задачи воспользоваться квазистатическим критерием устойчивости Д.Н.Работнова - С.А.Шестерикова, согласно которого величина критической нагрузки определяется выражением:

$$P_* = \frac{P_0}{1 - E \frac{\gamma}{m}} \quad (8)$$

Критерий был разработан авторами на основании соотношений теории упрочнения: $\Phi(\dot{\rho}, \rho, \sigma) = 0$ ($\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = \gamma$, $\frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = m$).

В работе показано, что критерий в форме (8) пригоден и для зависимостей теории старения $\Phi(\sigma, \rho, t) = 0$. Но совпадение значений критических нагрузок по обеим теориям не означает, что будут также совпадать и значения критических деформаций. Выполненные в работе подсчеты показывают, что значения критических деформаций, вычисленных на основе теории старения, всегда превышают значения критических деформаций, вычисленных по теории упрочнения.

Если представить уравнение (7) в виде:

$$\Phi \equiv \rho - \varphi(t) \text{sh} \lambda \Delta \sigma = 0,$$

то величина предельной нагрузки P_* по критерию (8) будет равна:

$$P_* = \frac{P_0}{1 + E \varphi(t) \Delta \sigma \text{sh} \lambda \Delta \sigma},$$

откуда для функции времени $\varphi(t)$ получим:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\Delta \sigma E \text{sh} \lambda \Delta \sigma} \left(\frac{1}{2} - 1 \right) \quad (9)$$

Выражение (9) отличается от полученного выше на основе линейного уравнения связи решения (5) множителем $1/\text{sh} \lambda \Delta \sigma$, который и отражает влияние уровня сжимающих напряжений на величину $t_{кр}$. После подстановки (9) в (7) придет к значению для безразмерного параметра критических деформаций в виде:

$$\bar{\epsilon}_* = \frac{\epsilon(t)}{\epsilon(0)} = 1 + \frac{1}{A \epsilon \epsilon h A B} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right).$$

В этом решении также используется обобщенная кривая ползучести капролона при линейном сжатии (рис.3), с помощью которой по значению параметра $\bar{\epsilon}_*$ можно приближенно определить величину критического времени $t_{кр}$.

Сравнение расчетных значений критического времени, найденных приближенным путем по обобщенной кривой ползучести (крестики), с экспериментальными результатами (кружки) показано на рис.4. Вертикальная штрих-пунктирная линия на рисунке отвечает критерию Джерарда, пунктирная кривая аппроксимирует опытные данные. Как видно из рисунка, наибольшее расхождение между расчетными и опытными значениями $t_{кр}$ составляет величину порядка 15%.

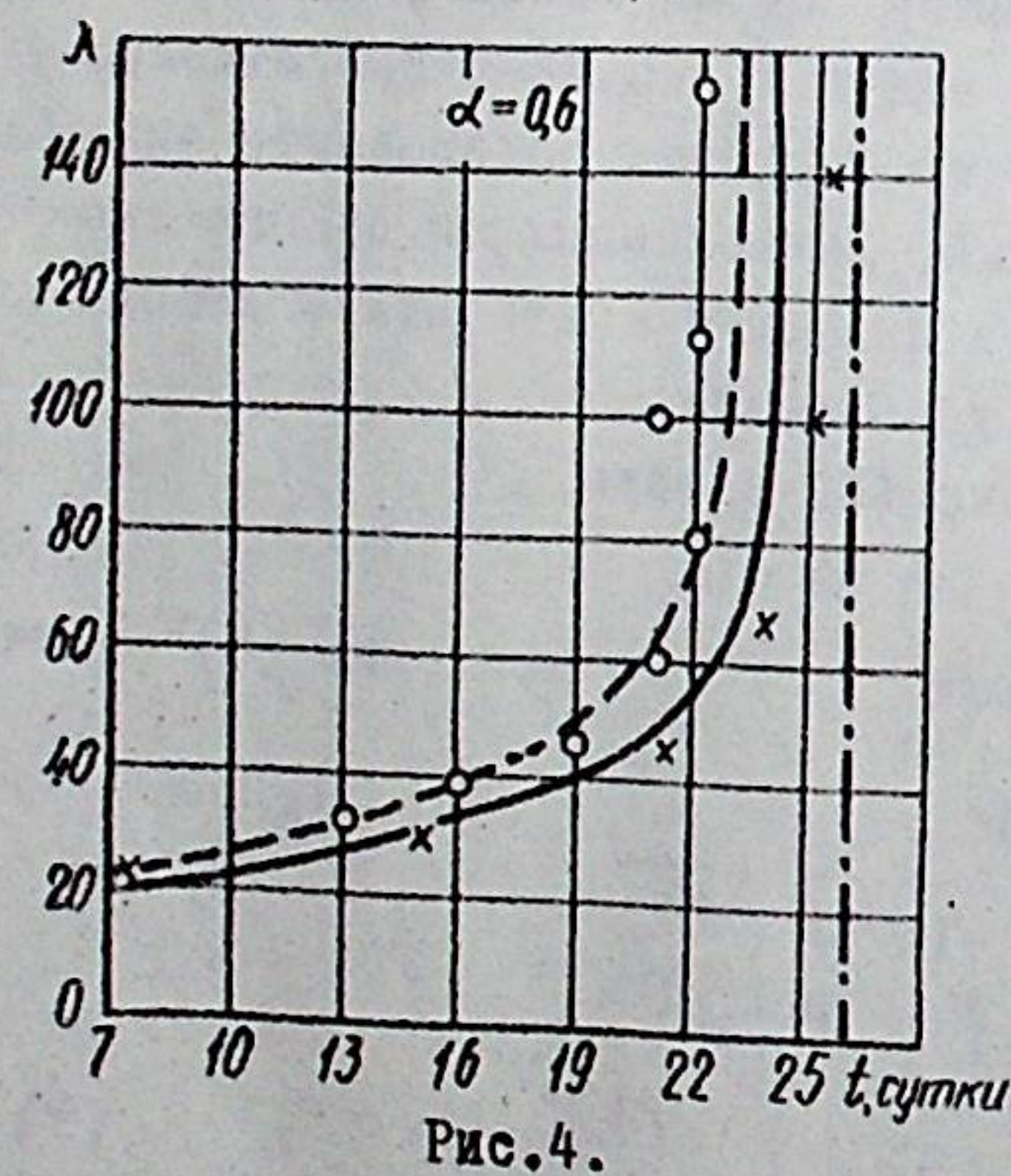


Рис.4.

Все вычисления проводились на ЭЦМ Урал-2. Алгоритм расчета был составлен на основе прямого метода расчета напряжений и прогибов, который в 1952 году предложил Т.Лин. При составлении алгоритма был также использован способ одноточечной коллокации, заключающийся в том, что изогнутая ось стержня принимается в виде полуволны синусоиды, а расчет напряжений и

прогибов ведется только для среднего сечения. Расчеты производились для шарнирно закрепленных стержней из капролона прямоугольного сечения (ширина $b = 25$ мм, высота $h = 8$ мм), сжатых постоянной силой P . При этом величина параметра α изменялась в пределах от 0,8 до 0,4, а гибкость стержня λ от 150 до 20. Начальное искривление стержня $f(0)$ задавалось в виде полуволны синусоиды:

$$f(0) = \frac{f_0}{1-\alpha} \sin \frac{\pi x}{l}$$

(f_0 - начальная погиб стержня до нагружения), а расчеты велись для пяти значений начального прогиба $f(0)/h = 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1$. С учетом значений начальных прогибов $f(0)$ напряжения в среднем сечении определялись в пяти точках с координатами: $z = \frac{h}{2}; \frac{h}{4}; 0; (-\frac{h}{4}); (-\frac{h}{2})$.

Результаты расчета на ЭЦМ были представлены в виде графиков прогиб-время, а также эпюр распределения нормальных напряжений в среднем сечении стержня в различные моменты времени. Выполненные расчеты показали, что качественный характер процесса потери устойчивости сохраняется при различных значениях параметров $\alpha, f(0), \lambda$, однако величина критического времени существенно зависит от значений этих параметров.

На рис.4 по результатам расчета на ЭЦМ построен график, определяющий зависимость критического времени от гибкости стержня (сплошная линия). Как видно из рисунка, результаты машинного расчета подтверждаются опытом (кружки). Наибольшее расхождение между расчетными и опытными величинами составляет 10%. Последнее указывает на состоятельность использования нелинейного уравнения связи (7) для практических расчетов на продольный изгиб капролоновых стержней при ползучести, а также пригодность для таких расчетов прямого метода расчета напряжений и прогибов по способу Т.Лина.

ВЫВОДЫ

Несмотря на широкое использование в современной технике разнообразных полиамидных пластмасс (капролон, поликапролак-

там, полиамид П-68 и др.), методы расчета конструктивных элементов из таких материалов на прочность, жесткость и устойчивость еще недостаточно разработаны. В частности, неисследованным оставался вопрос устойчивости полиамидных стержней при ползучести.

2. Работа посвящена экспериментальному исследованию устойчивости при ползучести центрально сжатых постоянной силой капролоновых стержней и разработке инженерных методов их расчета.

3. Экспериментальное исследование устойчивости при ползучести центрально сжатых стержней из капролона (МРТУ-6-03-988-66) было выполнено на специально сконструированной для этой цели установке, позволяющей проводить длительные испытания одновременно целой партии образцов различной гибкости при различных уровнях начальных напряжений и температурах внешней среды. Все эксперименты проводились на образцах прямоугольного сечения ($b = 25$ мм, $h = 8$ мм) различной длины (260, 225, 180, 132, 110 89 мм) по единой, разработанной для таких испытаний методике.

4. Как показали эксперименты, поведение сжатого постоянной силой капролонового стержня с начала нагружения до момента потери им устойчивости характеризуется непрерывным во времени ростом прогибов. В момент потери стержнем устойчивости наблюдается резкий рост этих прогибов (скорость нарастания прогибов стремится к бесконечности). Экспериментально за критическое время принималось время от начала нагружения до момента достижения прогибом среднего сечения стержня величины, равной половине его высоты.

5. Величина критического времени существенно зависит от параметра $\alpha = \frac{\sigma}{\sigma_s}$ характеризующего уровень начального напряжения. Для стержней гибкостью $\lambda > 50$ величина критического времени при фиксированном значении α не зависит от гибкости. При $\lambda < 50$ величина $t_{кр}$ существенно зависит от гибкости.

6. Величина критического времени уменьшается с увеличением начального прогиба стержня $f(0)$. Так при $f(0) = 0,02h$

и 0,1 критическое время соответственно уменьшается на 20 и 75% по сравнению со стержнем, у которого $f(0) = 0,01h$.

7. С повышением температуры внешней среды величина критического времени также уменьшается. Так, если при $T = 20^\circ\text{C}$ стержень с параметром $\alpha = 0,4$ теряет устойчивость по истечении 300 суток, то при $T = 40^\circ$ и 60°C потеря устойчивости происходит соответственно через 30 и 3 суток.

8. Чтобы определить величину критического времени аналитическим путем, в работе было выполнено приближенное решение задачи об устойчивости прямолинейного капролонового стержня на основе линейного и нелинейного уравнений связи. Результаты этих решений сопоставлялись с экспериментальными данными.

9. Решение задачи в первом приближении на основе линейного уравнения связи приводит к критерию критической деформации Джерарда. При этом величина критического времени остается неопределенной.

10. Для практических расчетов численное значение критического времени можно приближенно определять по величине эйлеровой критической деформации с помощью кривых ползучести капролона при линейном сжатии. Сопоставление расчетных результатов с экспериментальными данными показало, что такой упрощенный способ определения $t_{кр}$ можно в первом приближении применять лишь для стержней гибкостью $\lambda > 50$. При этом расхождение составляет 25%.

11. Приближенное решение задачи об устойчивости капролонового стержня на основе нелинейного уравнения связи (7) с использованием критерия Ю.Н.Работнова и С.А.Шестерикова и кривых ползучести капролона при линейном сжатии приводит для всех значений гибкостей от 150 до 20 к удовлетворительному совпадению опытных величин критического времени с расчетными. Величина расхождения при этом достигает 15%.

12. С целью учета начальных несовершенств геометрической формы и материала стержня (наличие начальной погиби, различие в реономных свойствах капролона при растяжении, сжатии), решена аналогичная задача на основе нелинейного уравнения связи с помощью ЭЦВМ.

13. Сравнение численных результатов расчетов на ЭЦВМ с

опытными данными показало, что разработанный на основе прямого метода Т.Лина расчетный алгоритм достаточно полно отражает для капролоновых стержней характер процесса потери ими устойчивости.

14. Форма предложенного в работе алгоритма может быть рекомендована для решения задач подобного типа применительно к стержням из других пластмасс, ползучесть материала которых достаточно изучена.

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Продольный изгиб стержней из пластмасс при ползучести. Труды Казанского авиационного института, "Авиационная технология и организация производства". Вып. 131, 1971.

2. Продольный изгиб центрально сжатых стержней из капролона при ползучести. Труды ЛПИ № 321. "Машиностроение", 1971 (в соавторстве).

3. К вопросу об устойчивости пластмассовых стержней при ползучести. Материалы научно-технической конференции гидротехнического факультета ЛПИ им. М.И. Калинина, 1970.

Подписано к печати 9/ХП-1971г.

М 57338.

Заказ 180

Тираж 120.

Бесплатно

Отпечатано на ротапринте Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина

194251, Ленинград, Политехническая, 29