

## К ВОПРОСУ О ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИЯХ ДЛИТЕЛЬНО ЗАГРУЖЕННОЙ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

Гоменюк В.М. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

**Исследуются вопросы поведения кладок из различных каменных материалов в условиях длительного нагружения.**

Известно, что каменные и армокаменные конструкции выполняются из различных каменных материалов. Широко используются искусственные каменные материалы – глиняный и силикатный кирпич, естественные – известняки и туфы. Все они имеют весьма различные физико-механические свойства, а также формы и размеры. Все они обладают различными упругими и пластическими деформациями, деформациями ползучести.

Также известно, что деформативность каменных материалов играет немаловажную роль при выполнении кладки по системе «МИДИС», кладки с притертым швом и др. Большую роль играют длительные деформации кладки при ее выполнении с облицовкой различными плитками. Имеются примеры, когда облицовочные плиты отслаивались от кладки (или разрушались) даже через 8-10 лет после ее выполнения с облицовкой. К таким последствиям приводят длительные деформации, доля которых весьма значительна в общих деформациях кладки. Еще большую роль в работе каменной кладки играют длительные деформации при ее работе на сейсмические нагрузки. Дело в том, что к моменту появления сейсмических нагрузок, жесткость и прочность кладки (как правило) имеют значения, отличные от тех, которые были приняты при проектировании и возведении здания. Так, прочность на растяжение материалов уменьшается, модуль упругости материалов – увеличивается.

Поэтому вопросы, относящиеся к исследованиям прочности и жесткости каменных кладок, которые подвержены длительному (эксплуатационному) обжатию, являются актуальными.

Этим вопросам посвящены работы по всестороннему исследованию кладок из глиняного кирпича д.т.н. С.В.Полякова, а также исследования реологических свойств кладки из силикатного кирпича к.т.н. Г.Д.Шкляр, исследования автора статьи – кладке из пильных известняков.

Рассматривая полные (общие) деформации каменной кладки  $\varepsilon$ , можно их разделить на кратковременные  $\varepsilon_{кр}$  и длительные деформации – деформации ползучести  $\varepsilon_n$ . В свою очередь,  $\varepsilon_{кр} = \varepsilon_y + \varepsilon'_n$ . Следовательно, полные деформации каменной кладки можно представить в таком виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon'_n + \varepsilon_n + \varepsilon_{ус} \quad (1)$$

- где  $\varepsilon_y$  - упругие деформации каменной кладки, проявляющиеся при испытании образцов при подъеме напряжений от  $\sigma = 0$  до  $\sigma = \sigma_{разр.}$  ступенями, равными, примерно,  $\sigma = 0,1\sigma_{разр.}$  (с 5-минутной выдержкой нагрузки на каждой ступени);
- $\varepsilon'_n$  - деформации ползучести образцов кладки, которые проявляются при испытании их кратковременной ступенчатой нагрузкой;
- $\varepsilon_n$  - деформации ползучести кладки, проявляющиеся при испытании ее длительной нагрузкой;
- $\varepsilon_{ус}$  - усадочные деформации, проявляющиеся в кладке при длительном выдерживании без нагрузки.

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 1 показаны графики полных и относительных деформаций кладки  $\varepsilon$ .

По этим графикам можно установить, что при  $\chi = 0,5$  деформации ползучести  $\varepsilon_n$ , накопленные за время длительного обжатия кладки, составляют 75 % (и более) от кратковременных деформаций  $\varepsilon_{кр}$  по опытам с кладкой из глиняного кирпича (рис. 1, а). Аналогичное отношение величин деформаций  $\varepsilon_n / \varepsilon_{кр}$  наблюдается по опытам с кладкой из силикатного кирпича [5]. Для кладки из пильных известняков (рис. 1, б) это отношение составляет около 40 %.

Следовательно, для всех видов каменной кладки деформации ползучести  $\varepsilon_n$  составляют значительную долю от полных ее деформаций. Поэтому изучение длительных деформаций кладки (в данный момент еще не полное) представляет практический интерес.

Из большого числа факторов, влияющих на деформации ползучести [3], наибольшее влияние оказывает величина длительных напряжений  $\sigma_{обж}$  (для каменной кладки более удобно представлять зависимость

$\varepsilon_n$  от относительных напряжений  $\chi = \sigma_{обж.} / R_{32}$ , возраст кладки к моменту загрузки  $t_n$  и длительность обжатия  $\tau$ . В связи с этим, деформации ползучести кладки  $\varepsilon_n$ , обжатой постоянными напряжениями при центральном приложении нагрузки, определялись в зависимости от этих факторов.

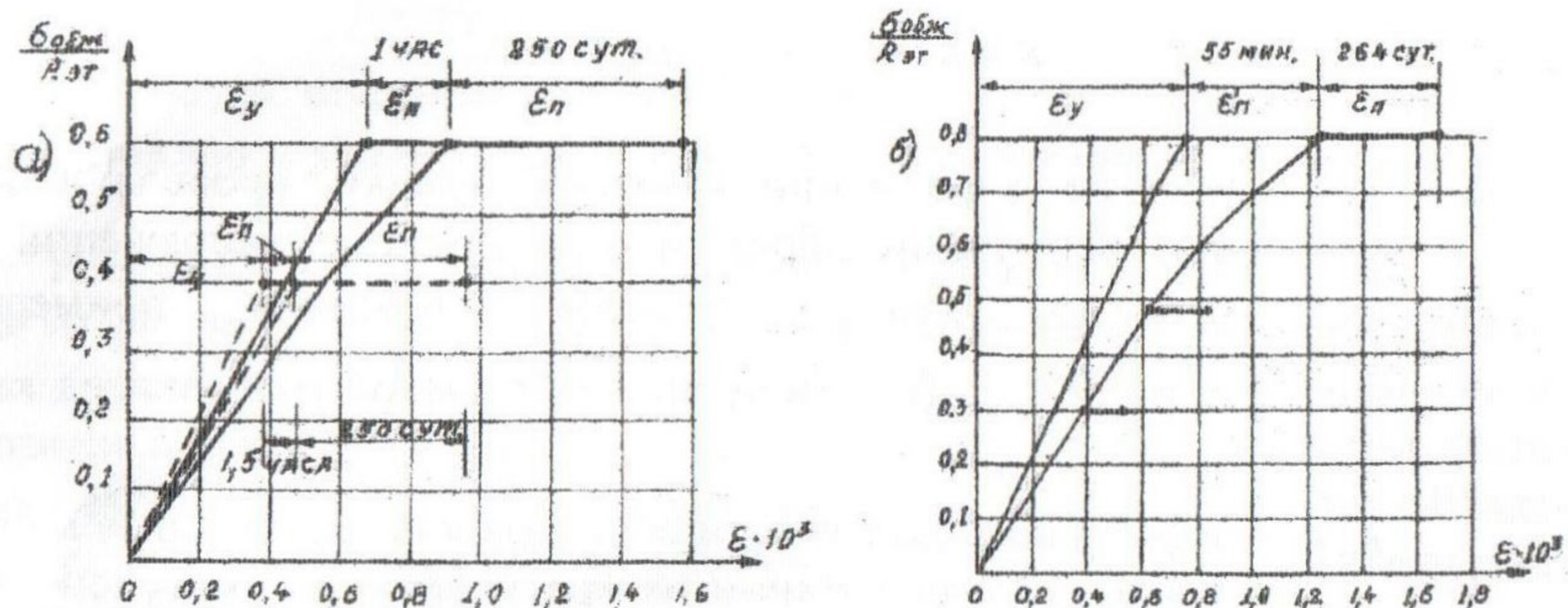


Рис. 1. Полные относительные деформации каменной кладки:  
 а) по опытам с кирпичной кладкой (серия Ж) С.В.Полякова;  
 б) по опытам с кладкой из пильных известняков (серия М) автора

Их,  $\varepsilon_n$  можно представить зависимостью:

$$\varepsilon_n = A \frac{\sigma_{обж.}}{R_{32}} \varphi(\tau) f(t_n). \quad (2)$$

Здесь  $R_{32}$  - прочность кладки в месячном возрасте.

Деформации усадки  $\varepsilon_{ус}$  из-за ограниченного объема статьи, а также из-за их малости и малого влияния на механические характеристики кладки, здесь не рассматриваются.

На рис. 2 показаны деформации ползучести образцов кладки в зависимости от длительности ее обжатия  $\tau$ , загруженных постоянной нагрузкой в возрасте 30-40 суток.

Из этих графиков следует, что деформации ползучести кладки  $\varepsilon_n$  в течение 1-2 суток интенсивно растут, затем их рост замедляется и наи-

большая их доля проявляется до 3-4 месяцев длительности обжата, хотя незначительный их рост наблюдается даже через несколько лет.

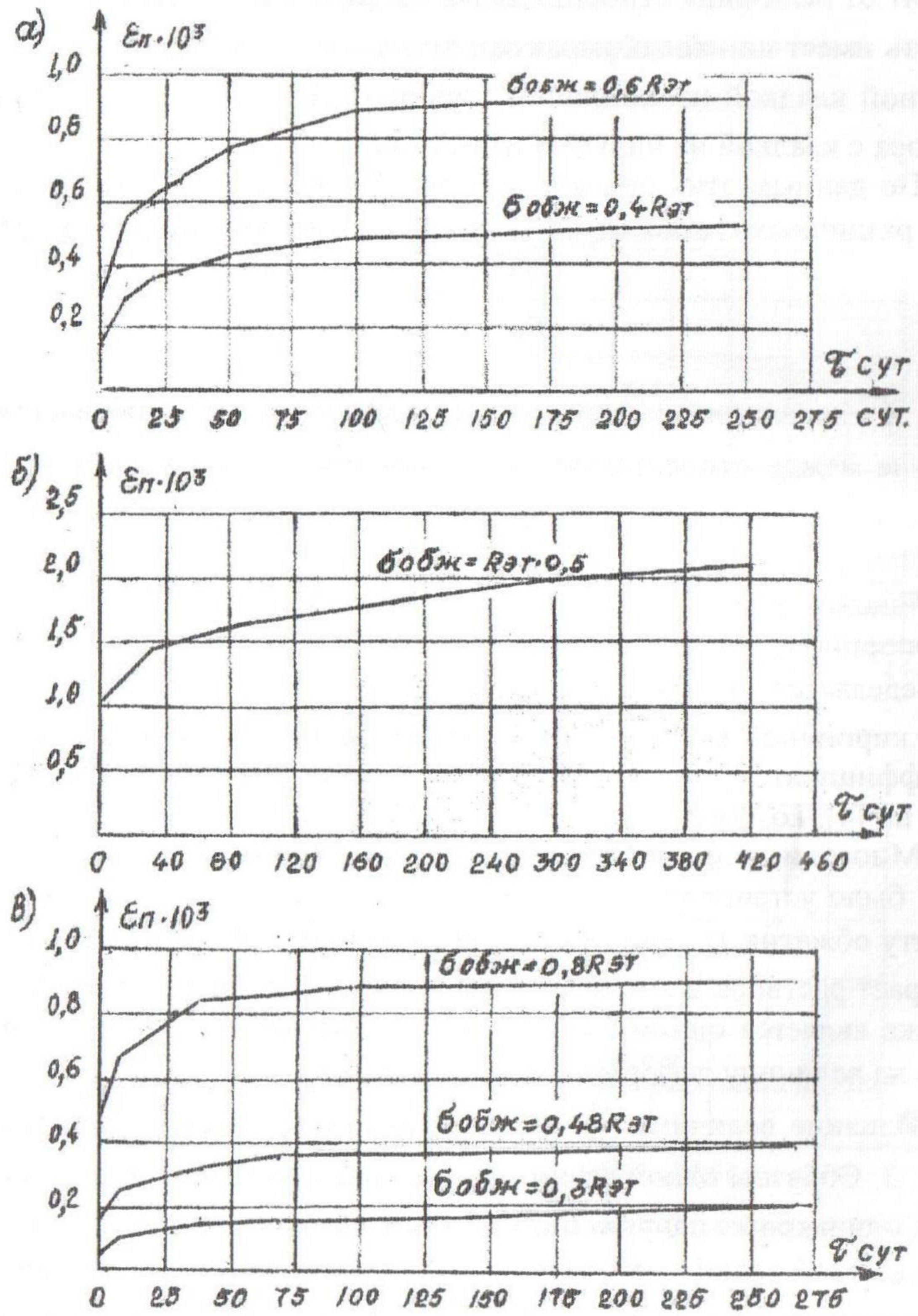


Рис. 2. Деформации ползучести образцов каменной кладки в зависимости от длительности действия постоянной нагрузки: а) по опытам С.В.Полякова с кладкой из обожженного кирпича (серия Ж); б) по опытам с кладкой из силикатного кирпича; в) по опытам автора с кладкой из пильных известняков (серия М)

Из графиков (рис. 2) также видно, что величина деформаций  $\varepsilon_n$  зависит от величины относительных напряжений  $\chi$ , причем эта зависимость имеет линейный характер, вплоть до  $\chi = 0,6$  - по опытам с кирпичной кладкой из глиняного кирпича [1] и до  $\chi = 0,5$  - по опытам автора с кладкой из пильных известняков [4].

По данным этих опытов, а также по данным других опытов [1, 4], для различных кладок можно выразить зависимость  $\varepsilon_n$  от  $\chi$  формулой

$$\varepsilon_n = A \cdot \chi, \quad (3)$$

где  $A$  - характеристика ползучести кладки  $\varepsilon_n$ , представляющая отношение между относительными деформациями ползучести  $\varepsilon_n$  и относительными напряжениями  $\chi$ .

Числовое значение характеристик ползучести  $A$  (коэффициента пропорциональности) для различных по материалам каменных кладок определяется из опыта. Так, например, для  $\tau = 50$  сут. и  $\sigma_{обж.} \leq 0,5R_{сж}$ , для кирпичной кладки из глиняного кирпича, серия Ж, по опытам [1], коэффициент  $A = 1,17 \cdot 10^{-3}$ ; для кладки из пильных известняков, серия М, по [4], коэффициент  $A = 0,66 \cdot 10^{-3}$ .

Многочисленными экспериментами с бетоном и кирпичной кладкой было установлено, что чем больше возраст образцов кладки к моменту обжатия  $t_n$ , тем меньше их ползучесть. Возраст кладки (вернее, возраст раствора в кладке) в момент приложения длительной нагрузки также является одним из факторов, оказывающих значительное влияние на величину деформаций ползучести  $\varepsilon_n$ .

Влияние величины  $t_n$  на деформации  $\varepsilon_n$  кладки представлено на рис. 3. Образцы одной серии загружались при разных значениях  $t_n$ , но при одинаковых напряжениях. Сравнение кривых ползучести в пределах каждой серии указывает на то, что величина деформаций  $\varepsilon_n$  значительно зависит от возраста кладки  $t_n$  и может быть выражена формулой

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n \cdot t_n \cdot 30} (a + b \cdot e^{-m \sqrt{t_n}}), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{n, t_n, 30}$  - деформации ползучести кладки при загрузении ее постоянной нагрузкой в возрасте  $t_n = 30$  суток.

Числовые значения коэффициентов определяются из опыта:  $a = 0,1$ ;  $b = 1,82$ ;  $m = 3$ ;  $n = 4$ .

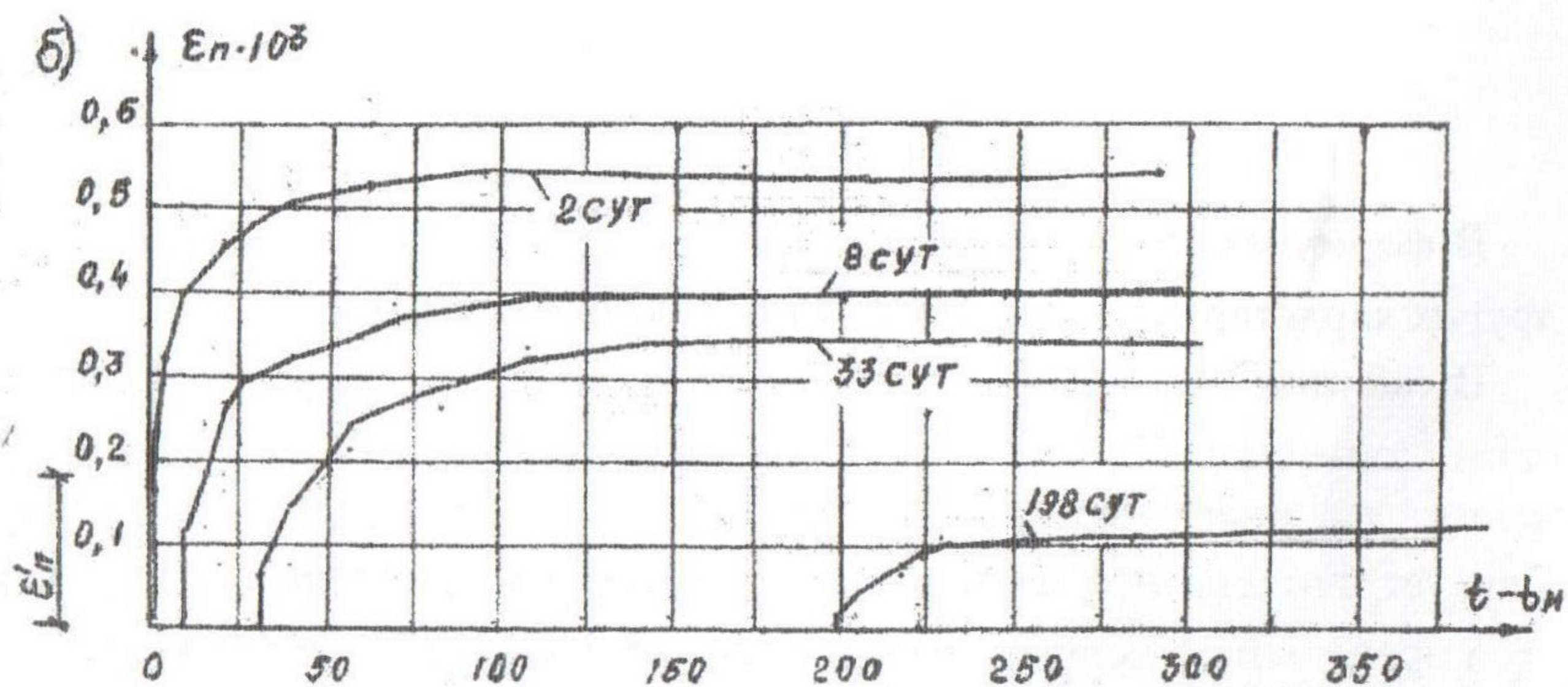
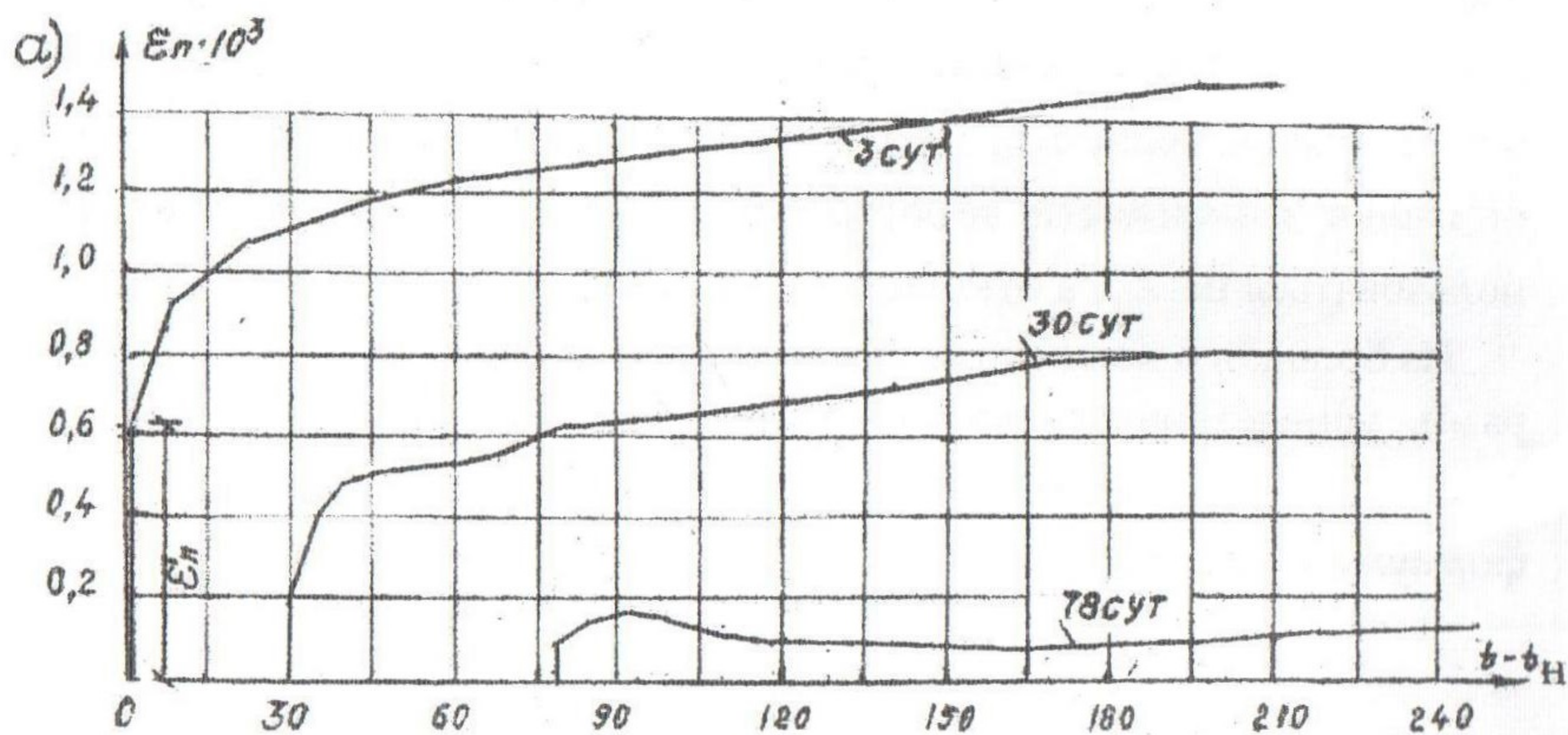


Рис. 3. Деформации ползучести кладки  $\varepsilon_n$  в зависимости от  $t - t_n$ :  
 а) по опытам с кирпичной кладкой [1]; б) по опытам с кладкой из пильных известняков [4]

Исходя из гипотезы о природе ползучести [3], нетрудно указать причину уменьшения деформации  $\varepsilon_n$  с ростом  $t_n$ . Такой причиной является увеличение вязкости и уменьшение гелевой структурной составляющей цементного камня во времени.

По кривым деформаций ползучести  $\varepsilon_n$  образцов кладки, нагруженных при разных  $t_n$  (рис. 3), видно, что интенсивность развития деформаций  $\varepsilon_n$  вначале, после загрузки ( в пределах, примерно, до  $\tau = 50$  сут.), меняется в зависимости от  $t_n$ . Интенсивность развития деформаций  $\varepsilon_n$  больше для меньших значений  $t_n$  (кривые круче). Таким образом, форма кривых ползучести  $\varepsilon_n$  более пологая для образцов с большим значением  $t_n$ . Вероятно поэтому, С.В.Поляков принял для описания зависимости деформаций  $\varepsilon_n$  от длительности обжата  $\tau$  пользоваться не  $\varepsilon_n$ , а отношением  $\varepsilon_n / \varepsilon_{n.50}$ .

Из большого количества формул, предложенного различными авторами, удовлетворительно описывают зависимость  $\varepsilon_n$  кладки от  $\tau$  формулы, предложенные С.В.Поляковым. Для отношения  $\varepsilon_n / \varepsilon_{n.50}$  формулы имеют вид

$$\varphi(\tau) = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n.50}} = C\tau^{1/p}, \quad (5)$$

$$\varphi(\tau) = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n.50}} = C_1(1 - e^{-m\tau^{1/3}}). \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) параметры  $C, C_1, p, m$ , зависящие от  $\chi, t_n$  и других характеристик, кроме  $\tau$ , определяются из опыта.

В таблице 1 приведены значения отношения  $\varepsilon_n / \varepsilon_{n.50}$  по эмпирическим формулам и средние значения этих величин при различных значениях  $\tau$ , вплоть до пятилетнего значения  $\tau$ , для различных кладок. Следует считать, что пятилетний срок развития деформаций  $\varepsilon_n$  является предельным, вследствие более быстрого роста прочности раствора в каменной кладке.

Сопоставление расчетных и опытных значений  $\varepsilon_n / \varepsilon_{n.50}$  указывает на удовлетворительное описание опытных данных принятыми формулами.

Влияние полных деформаций ползучести  $\varepsilon_n$  кладки из различных материалов, в зависимости от  $\chi, \tau$  и  $t_n$  (при соответствующих виду кладки характеристиках  $A$ ), можно описать формулой [1] вида

$$\varepsilon_n = A\chi(a + b \cdot e^{-m\sqrt{t_n}}) \cdot (t - t_n)^{1/p} \quad (7)$$

Таблица 1

Значения  $\varepsilon_n / \varepsilon_{n.50}$  по эмпирическим формулам и средние опытные значения

По опытам с кладкой из	Формулы для $\tau$	$\varepsilon_n / \varepsilon_{n.50}$ при $\tau$ в сутках								
		1	10	30	50	100	200	300	400	1800
	$C\tau^{1/7}$	0,55	0,78	0,92	1,0	1,12	1,22	1,3	1,35	1,68
	$C_1(1 - e^{-0,2\tau^{1/3}})$	0,39	0,7	0,9	1,0	1,12	1,29	1,31	1,34	1,42
Глиняного кирпича		0,36	0,7	0,92	1,0	1,08	1,23	1,31	1,33	-
Силикатного кирпича		0,6	0,76	0,92	1,0	1,08	1,18	1,23	1,26	-
Пильного известняка		0,43	0,71	0,91	1,0	1,09	1,13	1,15	1,16	-

Кроме опытов с кладкой, обжатой при постоянных во времени длительных напряжениях, были также выполнены опыты с кладкой из глиняного кирпича и кладкой из пильных известняков при возрастающих во времени напряжениях, имитирующих ее нагружение в процессе



возведения здания. Кривые деформаций  $\varepsilon_n$ , полученные этими опытами, приведены на рис. 4.

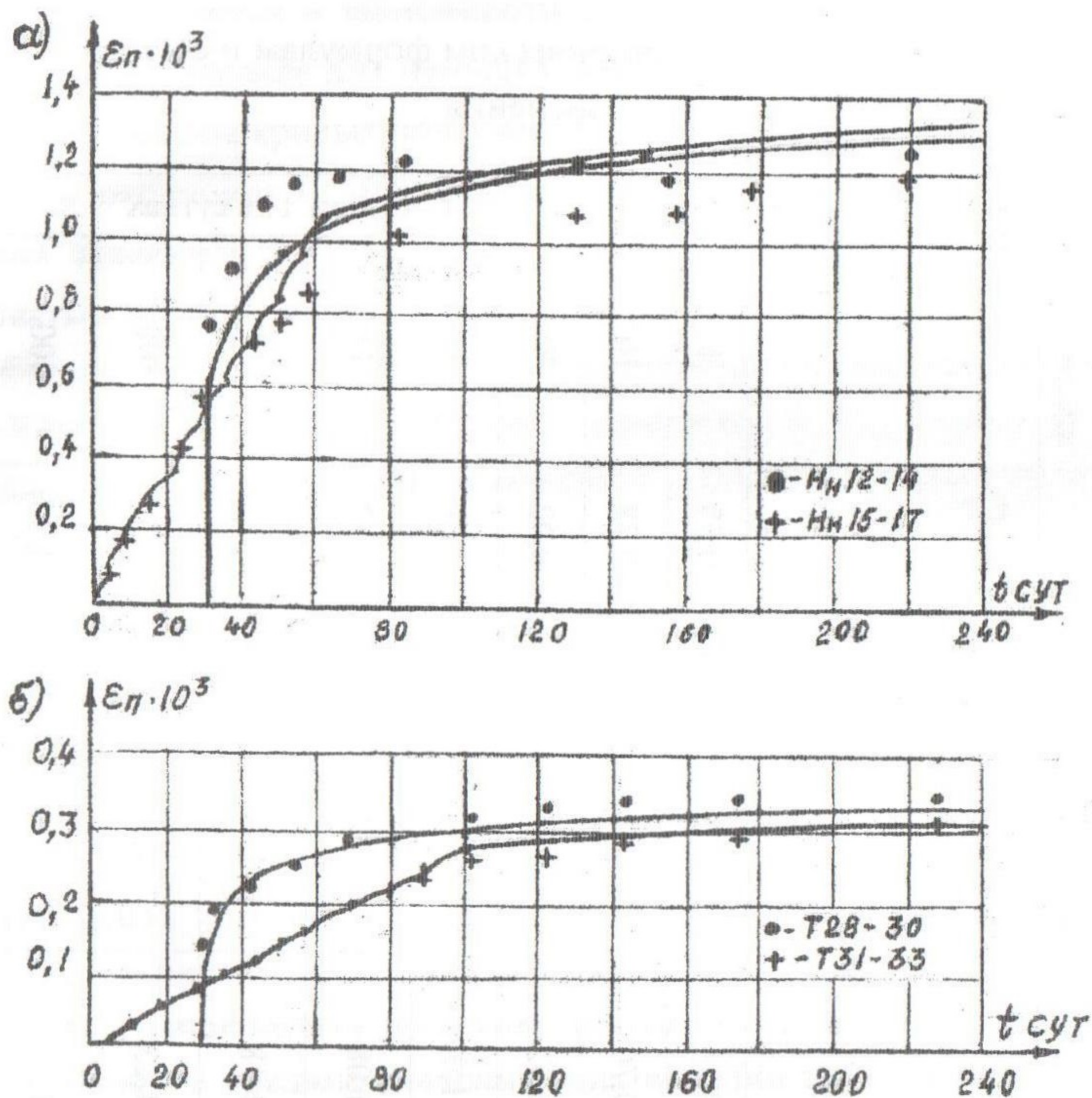


Рис. 4. Расчетные кривые деформаций ползучести кладки  $\varepsilon_n$  по формуле (8) и опытные точки деформаций  $\varepsilon_n$  образцов кладки, нагруженных при  $\sigma_{обж.} = 0,52 R_{32}$ : а) по опытам с кирпичной кладкой [1]; б) по опытам с кладкой из пильных известняков [4]

Как следует из графиков рис. 4, деформации ползучести  $\varepsilon_n$  образцов, нагруженных при возрастающих во времени напряжениях, имеют линейный характер и примерно одинаковые значения величин дефор-

маций  $\varepsilon_n$  (при  $\tau \geq 150$  сут.), с величинами  $\varepsilon_n$  для образцов, загруженных в месячном возрасте до одинаковых  $\sigma_{обж.}$ .

Деформации ползучести  $\varepsilon_n$  кладки, загруженной как постоянной нагрузкой при  $t_n = 30$  суток, так и при возрастающих нагрузках от  $\tau_n = 0$ , могут быть описаны формулой [1] вида

$$\varepsilon_n = A \sum_{s=1}^s \frac{\Delta\sigma}{R_{32}} (a + be^{-m\sqrt{t_n}})(t - t_n)^{1/p}, \quad (8)$$

где при  $\sigma_{обж.} \leq 0,5R_{32}$  и  $\tau \geq 1800$  сут. и значениях:  $a = 0,1$ ;  $b = 1,82$ ;  $m = 0,3$ ;  $p = 7$ ;  $n = 4$ , формула (8) показывает удовлетворительное совпадение величин  $\varepsilon_n$  с опытными их значениями.

### Вывод

Опыты показали, что в результате обжатия кладки длительными нагрузками меняется ее прочность и жесткость. Так, прочность кладки при длительных напряжениях, если они не доходят до напряжений, при которых в ней образуются трещины, увеличивается. Увеличивается также и начальный модуль деформаций кладки. Но пока опытных данных недостаточно, чтобы говорить о их числовых значениях.

### Литература

1. Поляков С.В. Длительное сжатие в кирпичной кладке. – Москва: Госстройиздат, 1959.
2. Поляков С.В. Ползучесть каменных и армокаменных конструкций//Сборник научных трудов ЦНИИСК. – Москва: Стройиздат, 1964.
3. Улицкий И.И. Ползучесть бетона. – Киев: Гостехиздат, 1950.
4. Гоменюк В.М. Влияние постоянных и постепенно возрастающих длительных нагрузок на прочность и деформации кладок и пильных известняков// Сборник научных трудов ЦНИИСК. – Москва: Стройиздат, 1964.
5. Шкляр Г.Д. Экспериментальное исследование реологических свойств каменной кладки из силикатного кирпича на цементно-известковом растворе Сборник научных трудов ЦНИИСК. – Москва: Стройиздат, 1964.