

УДК 69.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАРЕЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ТВЕРДЕНИЯ

Д.М. Кабанов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В настоящей статье приводится методика построения семейства кривых меры ползучести стареющего бетона в зависимости от различных температурных условий окружающей среды. Рассмотрены ситуации твердения бетона при постоянных, но различных по своему значению температурах в диапазоне от 20 до 50 градусов Цельсия, и при переменных, ступенчато повышающихся и понижающихся температурах в диапазоне от 9 до 50 градусов Цельсия. Показано, что в молодом бетоне влияние температуры на затвердевание смеси значительно превосходит ее влияние, оказываемое на вязкость геля цементного камня, что способствует занижению ползучести при повышенной температуре. Описан вариант решения проблемы получения заниженных значений деформаций ползучести при ступенчатом повышении температуры, основанный на использовании гипотезы приведенного времени. Проведенные исследования подтвердили факт отсутствия эффекта температурного последствия при определении ползучести бетона в условиях переменных, ступенчато понижающихся температур. На примере бетона, загруженного в возрасте 4 суток, была проанализирована важность учета температурных условий старения бетона, в частности, ступенчатый характер изменения температуры, приводящий к значительному увеличению ползучести бетона при ее повышении.

Ключевые слова: строительство, строительные конструкции, бетон, ползучесть бетона, мера ползучести, кривые ползучести, гипотеза приведенного времени, эффект температурного последствия, температура, влияние температуры.

Ссылка для цитирования: Кабанов Д.М. Определение ползучести стареющего бетона при различных температурных режимах твердения // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 3-10. EDN: DABKXW

AGING CONCRETE CREEP DETERMINATION UNDER VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS OF HARDENING

D.M. Kabanov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article presents a method for constructing a family of creep curves of aging concrete depending on various ambient temperature conditions. Concrete hardening situations are considered at constant but different temperatures in the range from 20 to 50 degrees Celsius, and at variable, stepwise rising and falling temperatures in the range from 9 to 50 degrees Celsius. It is shown that in young concrete, the effect of temperature on the solidification of the mixture significantly exceeds its effect on the viscosity of the cement stone gel, which contributes to an underestimation of creep at elevated temperatures. A solution to the problem of obtaining underestimated values of creep deformations with a stepwise increase in temperature is described, based on the use of the reduced time hypothesis. The conducted studies have confirmed the fact that there is no effect of temperature aftereffect in determining the creep of concrete under variable.

Keywords: construction, building structures, concrete, concrete creep, creep measure, creep curves, reduced time hypothesis, effect of temperature aftereffect, temperature, temperature effect.

For citation: Kabanov D.M. Aging concrete creep determination under various temperature conditions of hardening // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 3-10. EDN: DABKXW

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматриваются основные положения методики построения кривых мер ползучести стареющего бетона при различных способах учета температуры окружающей среды, основанной на экспериментальных данных П.И. Васильева, Б.А. Гаврилина и А.В. Малькевича [1–3]. Описанная методика позволяет получать семейства кривых, отражающих меру ползучести бетона в зависимости от рассматриваемого временного промежутка как при изотермическом температурном процессе, так и при повышении или понижении температуры за счет выделения участков постоянства действующих температур.

Определение термонапряженного состояния системы с учетом ползучести бетона в рамках линейной теории наследственного старения Маслова-Арутюняна принято осуществлять при помощи методики, основанной на использовании функции релаксации [4], либо с помощью итерационного метода начальных приращений или «ступенек», позволяющий, при желании, рассмотреть ползучесть бетона как нелинейную функцию времени, разбивая необходимый временной промежуток на расчетные интервалы. В работе Д.А. Страхова [5] доказано, что устойчивость системы при использовании метода «ступенек» значительно зависит от степени нелинейности деформаций ползучести, возможности их обратимости и характера разбиения на временные интервалы рассматриваемого отрезка старения бетонной конструкции.

Вопрос учета температурных воздействий на различные строительные конструкции также подробно рассмотрен в работах таких авторов, как Семенов К.В., Корсун В.И., Барабанщиков Ю.Г., Рыбаков В.А. и др. [6–11].

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ МЕР ПОЛЗУЧЕСТИ СТАРЕЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Для бетонных конструкций определяющее значение имеет температура, при которой протекает ползучесть. В зависимости от температурных условий, в которых «стареет» свежесушенный бетон, будет значительно изменяться скорость его гидратации, отчего, в свою очередь, будет зависеть скорость снижения его деформативности. Экспериментально доказано, что ползучесть при повышающихся температурах будет значительно больше, чем в условиях одинаковых средних температур окружающей среды.

Рассмотрим методику построения кривых мер ползучести бетона при действии произвольных, но постоянных по времени температур, согласно гипотезе приведенного времени. В таком случае, мера ползучести будет описываться зависимостью вида (1):

$$c(t, \tau, T) = \int_{\tau}^t \varphi(t_{\text{прив}}) \cdot \Delta f(t - \tau) \cdot K(T) \cdot dt, \quad (1)$$

где $\varphi(t_{\text{прив}})$ - функция влияния возраста бетона на скорость нарастания удельных деформаций ползучести;

$\Delta f(t - \tau)$ - приращение монотонно убывающей функции длительности приложения нагрузки, пропорциональной скорости нарастания деформаций ползучести стареющего бетона;

$K(T)$ - функция влияния температуры на вязкость геля цементного камня и связанной воды.

Согласно опубликованным научным результатам, функцию влияния возраста стареющего бетона на скорость нарастания удельных деформаций ползучести с достаточной точностью описывает эмпирическая зависимость (2):

$$\varphi(t_{\text{прив}}) = A + \frac{B}{C + \gamma \cdot t}, \quad (2)$$

где A, B, C, γ - эмпирические коэффициенты, принимаемые равными: $A = 0,85$; $B = 30$; $C = 5$; $\gamma = 1,1$; t - момент времени в координатах приведенного времени.

Монотонно убывающая функция длительности приложения нагрузки, в свою очередь, представляет собой экспоненциальную зависимость вида (3):

$$\Delta f(t - \tau) = C_0 \cdot [1 - \beta \cdot e^{-0,06 \cdot (t - \tau)}], \quad (3)$$

где C_0, β - эмпирические коэффициенты, принимаемые равными при $t - \tau \geq 1$: $C_0 = 1,55 \cdot 10^{-6}$; $\beta = 0,85$ и при $t - \tau < 1$: $C_0 = 5,21 \cdot 10^{-6}$; $\beta = 1$;

t - рассматриваемый момент времени;

τ - время загрузки конструкции.

Функция влияния температуры на вязкость геля цементного камня и связанной воды, в общем случае, носит нелинейный характер, проявляющийся на достаточно широких диапазонах температур. При рассмотрении исследуемых температур в рамках данной статьи, функцию $K(T)$ можно представить линейной зависимостью (4):

$$K(T) = \frac{40 + T}{60}, \quad (4)$$

где T - температура на рассматриваемом временном промежутке.

Для заданных температур в 20, 30, 40 и 50°C, функция $K(T)$ будет иметь следующие значения: $K(20^\circ) = 1$; $K(30^\circ) = 1,17$; $K(40^\circ) = 1,34$; $K(50^\circ) = 1,51$.

Гипотеза приведенного времени, предложенная П.И. Васильевым, позволяет учесть температурную предысторию твердения образца при помощи замены действительного момента времени приведенным согласно зависимости (5):

$$t_{прив} = \int_{\tau_0}^t F(T) \cdot d\tau, \quad (5)$$

где τ_0 - момент начала твердения конструкции;

$F(T)$ - функция, учитывающая ускорение старения бетона с повышением температуры.

Обработка экспериментальных кривых ползучести показала, что отношение промежутков времени, необходимых для определения значения функции старения бетона при различных, но постоянных во времени температурах, есть величина практически постоянная, что позволяет учитывать гипотезу приведенного времени для данного случая путем умножения действительного момента времени t на некоторое усредненное значение функции старения бетона $F(T)$ для рассматриваемой температуры, т.е. (6):

$$t_{прив} = t \cdot F(T), \quad (6)$$

Б.А. Гаврилиным [2] были выведены значения данной функции для рассматриваемых температур, а именно: $F(20^\circ) = 1$; $F(30^\circ) = 1,2$; $F(40^\circ) = 1,84$; $F(50^\circ) = 3,5$.

Для верификации описанной методики с опубликованными результатами экспериментов, рассмотрим семейство кривых мер ползучести бетона, стареющего в условиях постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C, приняв для построения момент загрузки конструкции, равный $\tau = 7$ сут и отсчитываемый с момента начала твердения бетона. Результаты построения кривых мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 7$ сут, при действии постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C на временном промежутке в 120 сут, приведены на рис. 1.

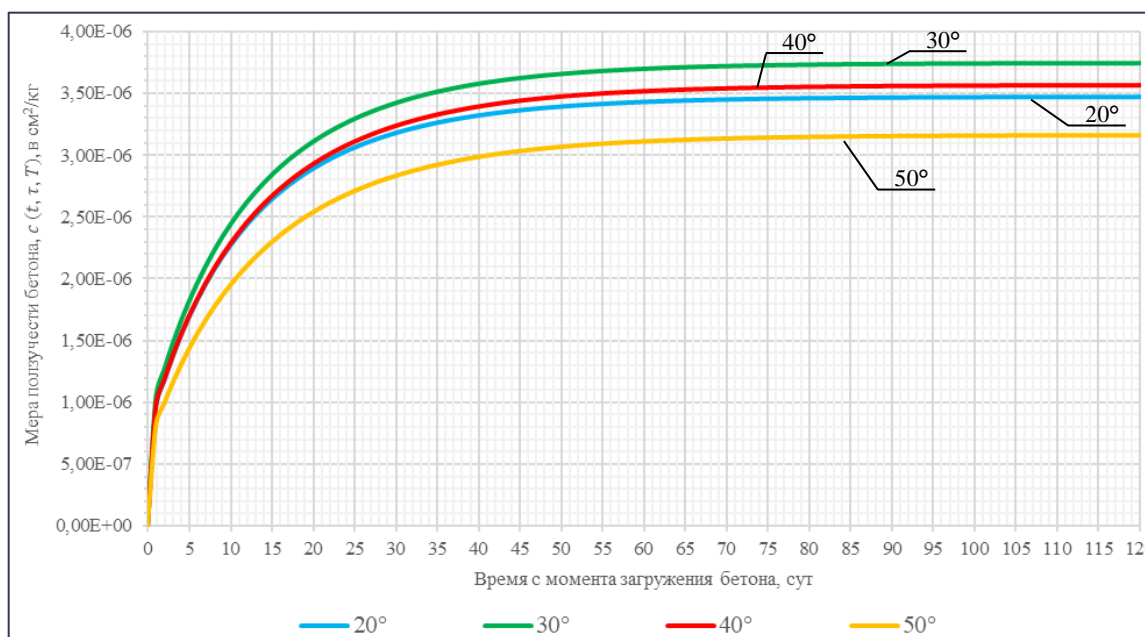


Рис. 1. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 7$ сут, при действии постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C

Fig. 1. The curves of the creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 7$ days, under the action of constant but varying temperatures in 20, 30, 40 and 50 °C

Как видно из рис. 1, ползучесть бетона при повышенной температуре в 50°C действительно оказалась меньше, чем ползучесть бетона при температуре в 20°C, как это и было показано в научных работах. Объясняется это тем, что в молодом бетоне влияние температуры на затвердевание смеси значительно превосходит ее влияние, оказываемое на вязкость геля цементного камня, что и занижает ползучесть при достаточно повышенной температуре. Тем не менее, доказано, что при повышении возраста бетона, например, при загрузении в возрасте 135 сут, будет наблюдаться противоположная ситуация из-за влияния температуры на вязкость геля цементного камня, вследствие чего ползучесть конструкции при повышенных температурах будет превосходить значения, полученные при температуре в 20°C и ниже, что также подтверждается на рис. 2.

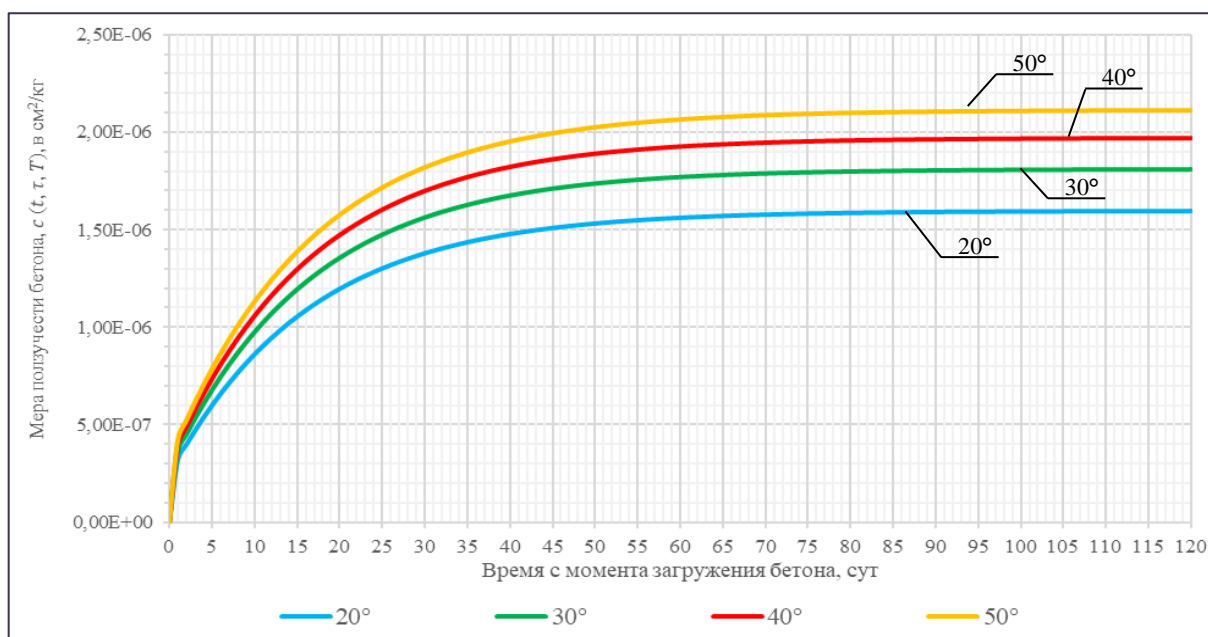


Рис. 2. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 135$ сут, при действии постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C

Fig. 2. The curves of the creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 135$ days, under the action of constant but varying temperatures in 20, 30, 40 and 50 °C

Таким образом, методика построения кривых мер ползучести в координатах приведенного времени, в условиях постоянных, но различных по величине температур, подтверждает экспериментальные данные и отражает необходимые характерные зависимости, описываемые авторами научных трудов [2].

Большой практический интерес представляет собой ситуация, в которой бетонная конструкция твердеет в условиях переменных, ступенчато повышающихся во времени температур. В этом случае, как было доказано экспериментально, имеет место эффект температурного последствия, заключающийся в интенсивном нарастании скорости деформаций ползучести при ступенчатом повышении температуры и проявляющийся однократно при условии периодического изменения температуры на одинаковую величину ступени.

Алгоритм построения кривых мер ползучести согласно зависимостям, отражающим эффект температурного последствия, подробно описан в [11]. Было доказано, что данная методика дает заниженные значения деформаций ползучести и не отражает наблюдаемого в опытах интенсивного нарастания деформаций ползучести бетона после повышения температуры.

Тем не менее, было предложено решать подобные задачи со ступенчатым повышением температуры согласно методике приведенного времени, позволяющей учесть эффект температурного последствия и получить достаточно точные результаты теоретических кривых ползучести, согласовывающихся с результатами экспериментальных данных.

Таким образом, аналитическое представление удельных деформаций ползучести стареющего бетона при переменных, ступенчато повышающихся во времени температурах, на основании работ Б.А. Гаврилина и А.В. Малькевича [2-3], следует принимать согласно зависимости (7):

$$c(t, \tau, T) = \sum \varphi(t_{прис}) \cdot \Delta f(t - \tau) \cdot K(T) + \Delta T \cdot \sum \varphi(t_{прис}) \cdot \Delta N(t - t_i), \quad (7)$$

где ΔT - разность действующих температур окружающей среды;

$\Delta N_T(t-t_i)$ - единичная функция температурного последствия, являющаяся функцией приращения деформаций ползучести, вызванной изменением вязких свойств геля цементного камня при повышении температуры окружающей среды на 1°C.

Единичная функция температурного последствия зависит только от величины температурного перепада, испытываемого конструкцией. При равных длительностях воздействия температур, повышающихся на один и тот же перепад, равный $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, функция может быть аппроксимирована одной зависимостью вида (8):

$$\Delta N(t - t_i) = \frac{A}{10} \cdot [1 - e^{-\gamma \cdot (t-t_i)}], \quad (8)$$

где A, γ - эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств бетона. Для рассматриваемого случая, принимаем $A = 0,27 \cdot 10^{-6}$; $\gamma = 0,4$;

$(t-t_i)$ - продолжительность воздействия определенной температуры.

В целях верификации результатов исследования, рассмотрим бетонную конструкцию, загруженную в возрасте $\tau = 4$ сут, при воздействии ступенчато повышающихся температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C, продолжительностью действия каждой ступени в 6 сут (рис. 3).

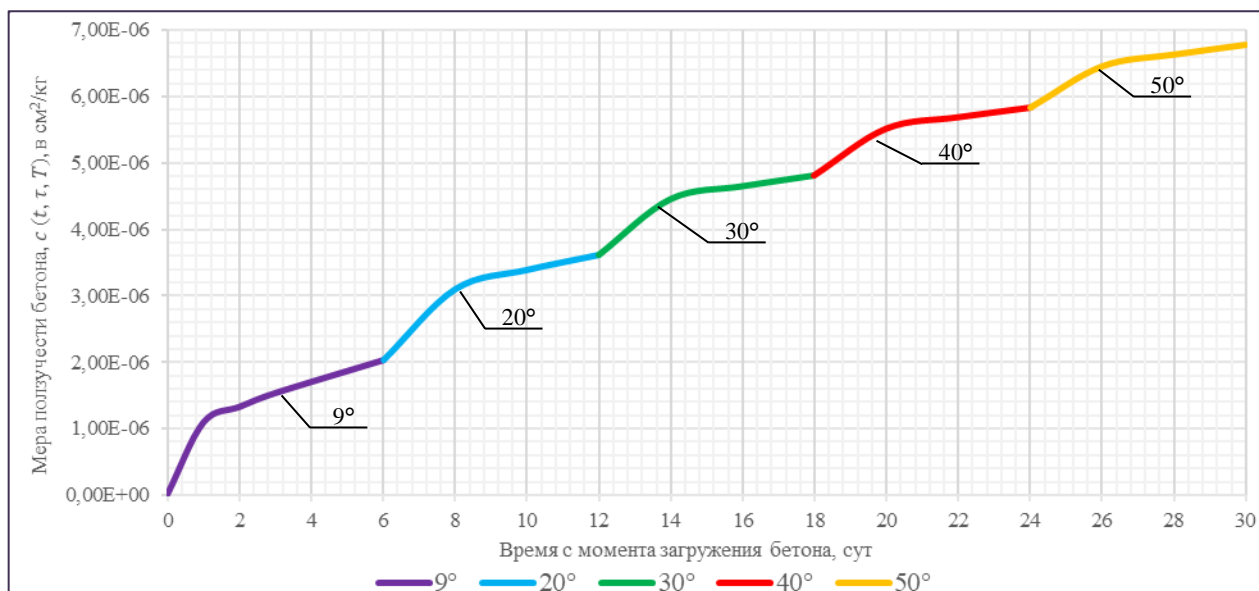


Рис. 3. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 4$ сут, при действии переменных, ступенчато повышающихся во времени температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C

Fig. 3. The curves of the creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 4$ days, under the action of variable, stepwise increasing temperatures in time at 9, 20, 30, 40 and 50 °C

В случае, когда рассматриваемая бетонная конструкция стареет в условиях переменных, но уже ступенчато понижающихся температур, никакого эффекта температурного последствия не возникает. Более того, кривая меры ползучести бетона в данном случае будет описываться зависимостью (1), как и в условиях действия постоянных, но различных по величине температур окружающей среды, что значительно упрощает их аналитическое построение, за исключением гипотезы приведенного времени, которая будет уже выражаться формулой (5). Результаты аналитического представления кривой меры ползучести бетонной конструкции, загруженной в возрасте $\tau = 4$ сут, при воздействии ступенчато понижающихся температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C, с продолжительностью действия каждой ступени в 6 сут, представлены на рис. 4.

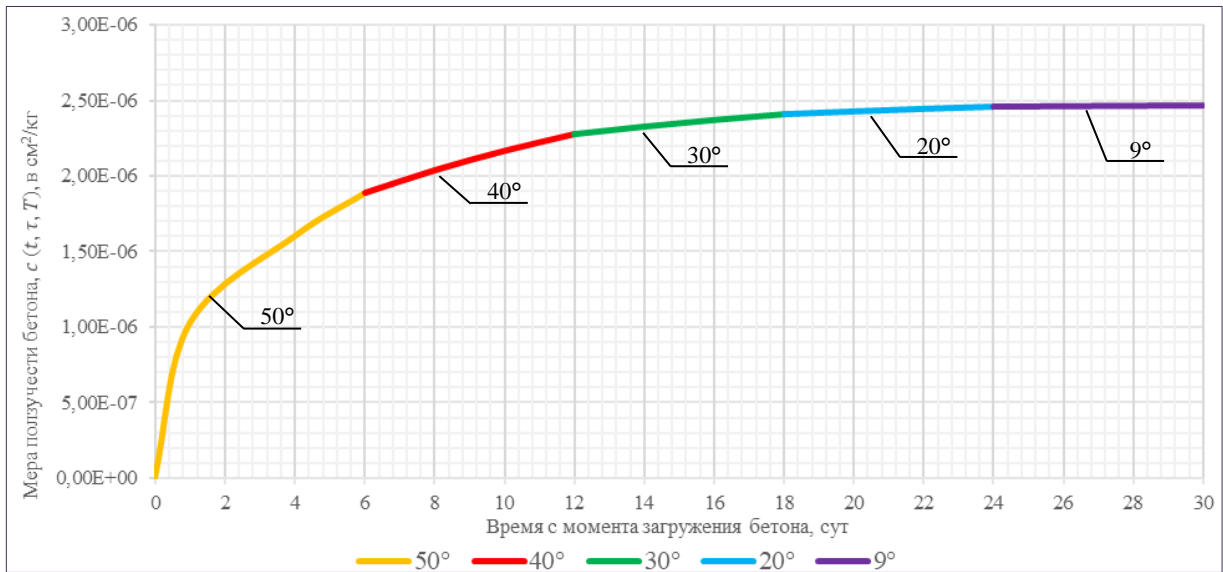


Рис. 4. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 4$ сут, при действии переменных, ступенчато понижающихся во времени температур в 9, 20, 30, 40 и 50 °С.

Fig. 4. Curves of creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 4$ days, under the action of variable, stepwise decreasing temperatures in time at 9, 20, 30, 40 and 50 °C.

Видно, что полученные кривые меры ползучести стареющего бетона в условиях переменных, ступенчато повышающихся и понижающихся температур, в значительной мере отражают характерные зависимости, описанные авторами в научных работах и подтверждают опубликованные экспериментальные данные [2].

Стоит отметить важность учета изменяющихся температур в процессе твердения бетона и их непосредственное влияние на конечную ползучесть конструкции. С целью согласования полученных результатов, зададимся конструкцией, загруженной в возрасте $\tau = 4$ сут, и рассмотрим значения меры ползучести при изотермическом старении под воздействием постоянных температур в 9, 20, 30, 40 и 50 °С и при ступенчато повышающихся и понижающихся температур заданного диапазона, по достижении 30 сут с момента загрузки конструкции. Результаты сравнения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение значений мер ползучести бетона при различных способах температурного воздействия
 Table 1. Comparison of the values of concrete creep measures under different methods of temperature exposure

День, сут	Мера ползучести бетона, $c(t, \tau, T)$, (см ²)/кг · 10 ⁶						
	9°	20°	30°	40°	50°	Ступенчато понижающиеся температуры	Ступенчато повышающиеся температуры
1	1,087	1,195	1,300	1,233	1,024	1,024	1,087
2	1,323	1,453	1,578	1,496	1,242	1,242	1,323
3	1,531	1,679	1,822	1,724	1,432	1,432	1,531
4	1,716	1,878	2,037	1,925	1,600	1,600	1,716
5	1,881	2,056	2,227	2,103	1,750	1,750	1,881
6	2,029	2,214	2,398	2,262	1,885	1,885	2,029
7	2,162	2,357	2,550	2,405	2,007	1,964	2,921
8	2,282	2,485	2,688	2,534	2,118	2,037	3,101
9	2,390	2,602	2,813	2,651	2,219	2,104	3,255
10	2,489	2,707	2,926	2,757	2,312	2,167	3,390
11	2,579	2,803	3,029	2,854	2,398	2,225	3,510
12	2,661	2,891	3,123	2,943	2,476	2,279	3,616
13	2,736	2,971	3,209	3,025	2,549	2,304	4,343
14	2,804	3,045	3,288	3,100	2,616	2,327	4,456
15	2,867	3,112	3,361	3,169	2,678	2,349	4,558

День, сут	Мера ползучести бетона, $c(t, \tau, T)$, (см ²)/кг · 10 ⁶						
	9°	20°	30°	40°	50°	Ступенчато понижающиеся температуры	Ступенчато повышающиеся температуры
16	2,925	3,174	3,427	3,233	2,736	2,369	4,650
17	2,978	3,231	3,489	3,292	2,790	2,388	4,734
18	3,027	3,283	3,545	3,346	2,840	2,406	4,810
19	3,072	3,332	3,598	3,397	2,886	2,415	5,419
20	3,114	3,376	3,646	3,443	2,929	2,424	5,519
21	3,152	3,418	3,691	3,487	2,969	2,433	5,610
22	3,187	3,456	3,732	3,527	3,007	2,441	5,692
23	3,220	3,491	3,771	3,564	3,042	2,448	5,768
24	3,251	3,524	3,806	3,599	3,074	2,455	5,837
25	3,279	3,555	3,839	3,632	3,105	2,458	6,358
26	3,305	3,583	3,870	3,662	3,133	2,460	6,461
27	3,329	3,609	3,898	3,690	3,160	2,462	6,554
28	3,352	3,634	3,925	3,716	3,185	2,464	6,639
29	3,373	3,656	3,950	3,740	3,208	2,466	6,716
30	3,392	3,677	3,973	3,763	3,230	2,468	6,786

Согласно полученным данным, ползучесть бетона при ступенчато повышающихся температурах с 9° до 50°, к 30 дню после начала загрузки конструкции, будет превышать в 1,7 раза ползучесть той же бетонной конструкции, твердевшей в изотермических условиях при температуре в 30°, и в 2,1 раза для изотермического старения при температуре в 50°. При этом, стоит отметить, что ступенчатое понижение температуры значительно снижает ползучесть бетона, что проявляется с самого начала загрузки конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При определении ползучести бетонных конструкций, необходимо учитывать температурные условия окружающей среды, в которой происходит твердение бетона, в особенности, ступенчатый характер изменения температуры, приводящий к значительному увеличению ползучести бетона при ее повышении.

Учитывая высокую степень согласования полученных результатов с опубликованными данными экспериментов, можно использовать приведенную методику для учета температурных воздействий при расчете железобетонных конструкций с учетом дополнительных факторов, таких, как нелинейные деформации ползучести бетона, температурные воздействия, перераспределение напряжений, геометрическая нелинейность и возникновение трещин в растянутой зоне конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев П.И. Некоторые вопросы ползучести бетона: Автореф. дис. ... доктора техн. наук. Л.: ЛПИ. 1963. 29 с.
2. Гаврилин Б.А. Влияние температурного режима на ползучесть стареющего бетона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л. 1970. 23 с.
3. Малькевич А.Б. Термоползучесть старого теплоизолированного бетона (экспериментально-теоретическое исследование при различных режимах нагружений и нагрева): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1988. 24 с.
4. Васильев П. И., Гаврилин Б. А. Влияние температуры на ползучесть стареющего бетона // Ползучесть и усадка бетона. – М.: Стройиздат. 1969. С. 9-20.
5. Страхов Д.А. Статический расчет стержневых железобетонных конструкций с трещинами в растянутой зоне при нелинейной ползучести бетона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1977. 16 с.
6. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В. О повышении пластичности гидротехнических бетонов // Гидротехническое строительство. 2007. №5. С. 24-28. EDN: IANKQD
7. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шевелев М.В. Термическая трещиностойкость бетона фундаментных плит // Популярное бетоноведение. 2009. №1. С. 70-76. EDN: SBGJUZ
8. Korsun V., Vatin N., Korsun A., Nemova D. Physical-mechanical properties of the modified fine-grained concrete subjected to thermal effects up to 200 (2014) Applied Mechanics and Materials, 633-634, pp. 1013-1017. EDN: SNCVNR

9. Rybakov V., Panteleev A., Sharbabchev G., Epshtein E. Show-retaining system as a temporary decision for providing of the suitable temperature and humidity level of pitched roofs. (2014) Applied Mechanics and Materials, Vol. 584-586, Pp. 982-990. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.982 EDN: SMOXIT

10. Запорожец И. Д. Основы теории теплопроводности бетона // Научно-техническое совещание по изучению свойств бетона, определяющих его трещиностойкость в массивных гидротехнических сооружениях. 1963. С. 38-51.

11. Семенов К.В., Константинов И.А., Савченко И.А., Кокорева К.А., Нестеров А.А. Эффект температурного воздействия в расчетах термонапряженного состояния дискретно наращиваемых бетонных тел // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №5(32). С. 18-28. EDN: UKGYTP

ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Михайлович Кабанов – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: kabanov.dm@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy M. Kabanov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: kabanov.dm@edu.spbstu.ru