



УДК 691.33

Гришин И.В. – аспирант

E-mail: il6357@yandex.ru

Каюмов Р.А. – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: kayumov@rambler.ru

Иванов Г.П. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: ivanovGPI@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Экспериментальные исследования реологических свойств асфальтобетона при различных температурных условиях**

#### **Аннотация**

В статье представлен анализ экспериментальных данных о ползучести асфальтобетона при сжатии в условиях переменных температур. На основе анализа было проведено описание ползучести с помощью теории упрочнения, что в дальнейшем позволит определить степень релаксации напряжений в асфальтобетонных покрытиях. Кроме того, был выполнен анализ результатов описания длительной прочности асфальтобетона, проведенный другими авторами, для возможности прогнозирования долговечности покрытий.

**Ключевые слова:** асфальтобетон, ползучесть, релаксация, старение асфальтобетона, длительная прочность.

#### **Цель работы**

Ранее в работах [1, 2] рассматривалось влияние перепада температур на напряженно-деформированное состояние (НДС) асфальтобетонных (АБ) покрытий металлических мостов с ортотропной плитой. В частности, в [1] был проведен анализ возникающих напряжений в упругой постановке. В действительности, учитывая длительность температурного нагружения и особенности АБ, напряжения в покрытии могут в значительной мере снижаться вследствие их релаксации, о чем указано также в [3, 4]. Данное явление приводит к необходимости описания процесса ползучести АБ в зависимости от температуры и действующих нагрузок. С другой стороны, вследствие длительности действия температурной нагрузки, правильнее рассматривать длительную прочность асфальтобетона, а не кратковременную, как это делается при расчетах покрытий дорог на автомобильную нагрузку. Кроме того, необходимо учитывать, что со временем из-за старения АБ ползучесть, а вместе с ней и релаксация, уменьшаются, что приводит к необходимости определения свойств старого АБ. Все это говорит о необходимости экспериментальных исследований ползучести АБ при различных температурных условиях.

#### **Ползучесть нового асфальтобетона**

С целью описания релаксации АБ было принято решение получить кривые ползучести при сжатии, при различных уровнях нагружения и температуры. Для испытания был принят АБ класса Б-І, из которого формовались стандартные образцы-цилиндры высотой 71,4 мм. Все составляющие материалы были проверены и соответствовали нормативным требованиям. Температурный режим образцов осуществлялся за счет окружающей среды, для чего образцы с зимнего по летний периоды испытывались на открытом воздухе. Поскольку температура наружного воздуха быстро меняется, то в подобных условиях можно говорить только о средних температурах в течение испытания. Нагружение образцов осуществлялось с помощью рычага (рис. 1), где точки А, В, С – места измерения деформаций с помощью индикаторов часового типа, с ценой деления 0,01 мм.

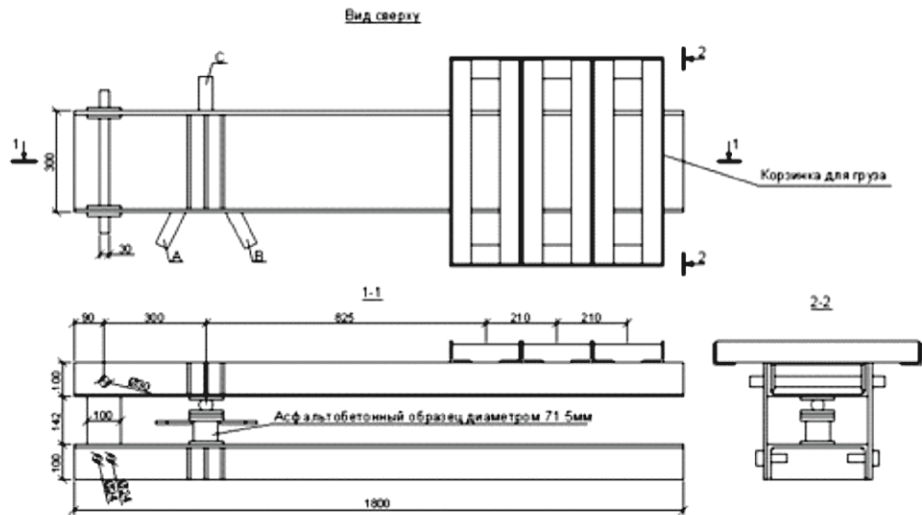


Рис. 1. Чертеж рычага

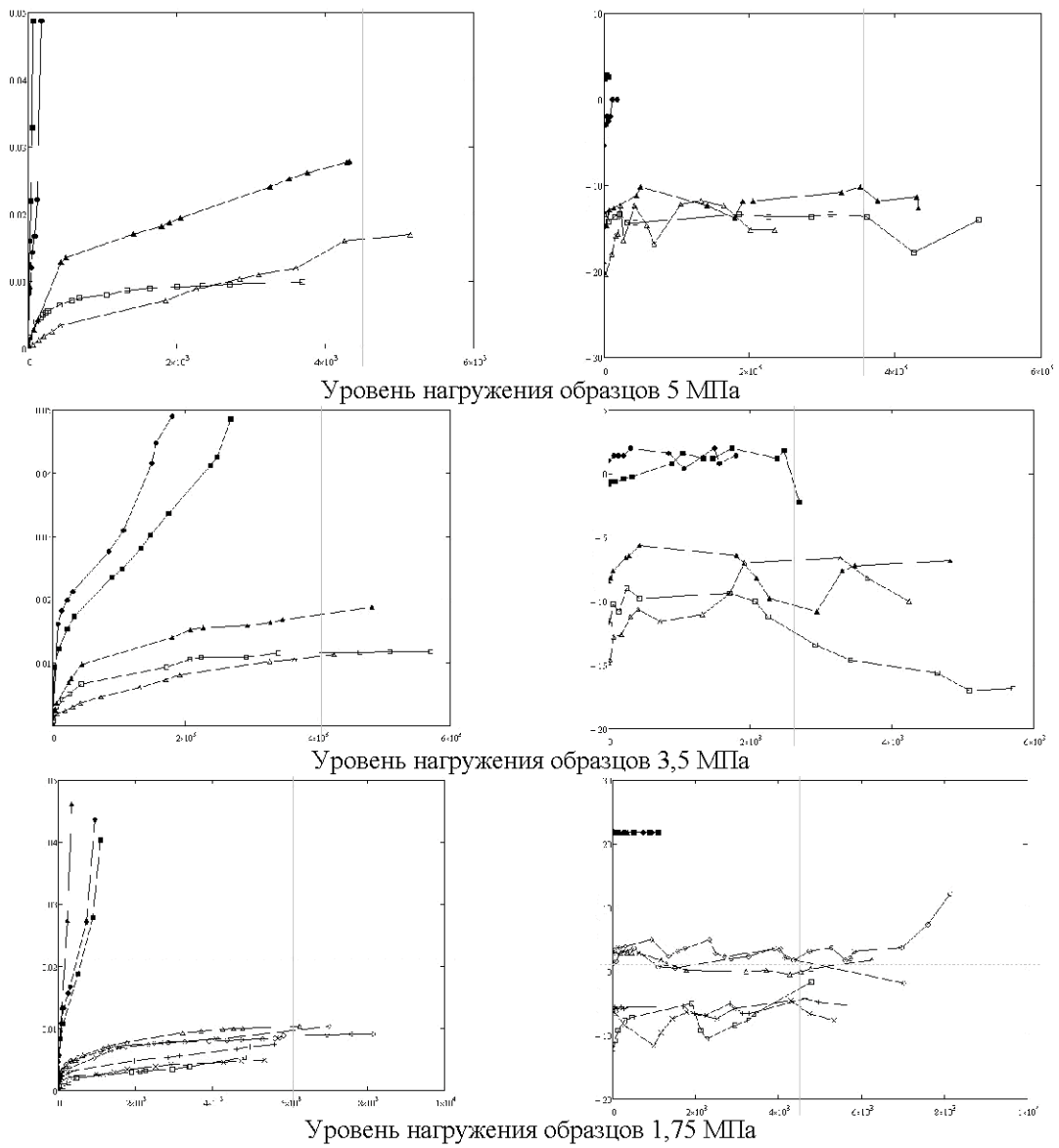


Рис. 2. Кривые ползучести и температуры

Для испытания были приняты следующие средние температуры:  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и следующие уровни нагружения: 5 МПа, 3,5 МПа, 1,75 МПа. При каждой температуре прикладывались все уровни нагружений. Результаты испытаний показаны на рис. 2, где время указано в секундах. При этом слева представлены графики относительных деформаций ( $\varepsilon$ ), а справа графики температур ( $t$ ). Соответствие между графиком температурного режима данного образца и графиком его деформаций устанавливается за счет одинаковых обозначений экспериментальных точек.

Для описания деформаций ползучести а/б была принята техническая теория упрочнения [3, 4] и соотношение вида:

$$\dot{\varepsilon}_{cr}(t) = \frac{\sigma^{k(T,\sigma)}}{1/(c(T) \cdot s^4(\sigma, T)) \cdot \varepsilon_{cr}^{\alpha}(t)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{cr}(t)$  – относительные деформации ползучести;

$\sigma$  – напряжения, МПа;

$t$  – время, с;

$T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициенты  $c(T)$ ,  $k(T, \sigma)$ ,  $s(\sigma, T)$ , зависящие от температуры и напряжений, и  $\alpha$ , принятый равным 3, подбираются так, чтобы наиболее точно описать опытные кривые. Интегрируя (1) в предположении, что напряжения постоянны во времени, получаем искомую функцию, описывающую деформацию ползучести:

$$\varepsilon_{cr}(t) = \sqrt[4]{4 \cdot c(T) \cdot \sigma^{k(T,\sigma)} \cdot t \cdot s(\sigma, T)} \quad (2)$$

В результате обработки экспериментальных данных, представленных на рис. 2, были получены необходимые коэффициенты, для различных уровней напряжений:

1) Для напряжений 0-1,75 МПа:

$$c(T) = 350 + 310 \cdot e^{-0,16T}, k(T) = -15,5 - 15,5 \cdot e^{-0,04T}, s(\sigma, T) = \frac{\sigma/1,75}{71,2}.$$

2) Для напряжений 1,75-3,5 МПа:

$$c(T) = 350 + 310 \cdot e^{-0,16T}, k(T) = (-15,5 - 15,5 \cdot e^{-0,04T}) \cdot (1 - (\sigma - 1,75) \cdot 0,171),$$

$$s(\sigma, T) = \frac{1 + (\sigma - 1,75) \cdot 33,71}{71,2}.$$

3) Для напряжений 3,5-5 МПа:

$$c(T) = 350 + 310 \cdot e^{-0,16T}, k(T) = (-15,5 - 15,5 \cdot e^{-0,04T}) \cdot (0,7 - (\sigma - 3,5) \cdot 0,133),$$

$$s(\sigma, T) = \frac{60}{71,2}.$$

4) Для напряжений  $\geq 5$  МПа:

$$c(T) = 350 + 310 \cdot e^{-0,16T}, k(T) = (-15,5 - 15,5 \cdot e^{-0,04T}) \cdot (0,7 - (\sigma - 3,5) \cdot 0,133),$$

$$s(\sigma, T) = \frac{60}{71,2} (0,052 + 4,09 \cdot 10^{-3}T + 7,83 \cdot 10^{-5}T^2).$$

Результаты, показывающие сходимость экспериментальных результатов с полученными формулами, представлены на рис. 3. При этом, поскольку температура эксперимента переменна, для уравнения (2) принималось среднее значение температуры. Значения температур и уровней нагружения, для которых были построены графики, указаны под рисунками.

### Ползучесть старого асфальтобетона

Об изменении свойств асфальтобетона при старении и причинах этого явления указано, например, в работах [5, 6]. В частности, показано, что способность к релаксации напряжений у АБ со временем падает. Задача прогнозирования работы АБ в периоды, последующие после его укладки в покрытие, приводит к необходимости рассмотрения свойств АБ, подвергавшегося эксплуатации в течение определённого срока. Для этого из участка дороги, проходящей по пл. Тысячелетия (возле казанского Кремля) в г. Казани, был взят фрагмент покрытия. Покрытие состояло из верхнего слоя мелкозернистого АБ класса Б, толщиной 0,05 м и нижнего выравнивающего слоя среднезернистого или крупнозернистого АБ толщиной в среднем 0,05 м.

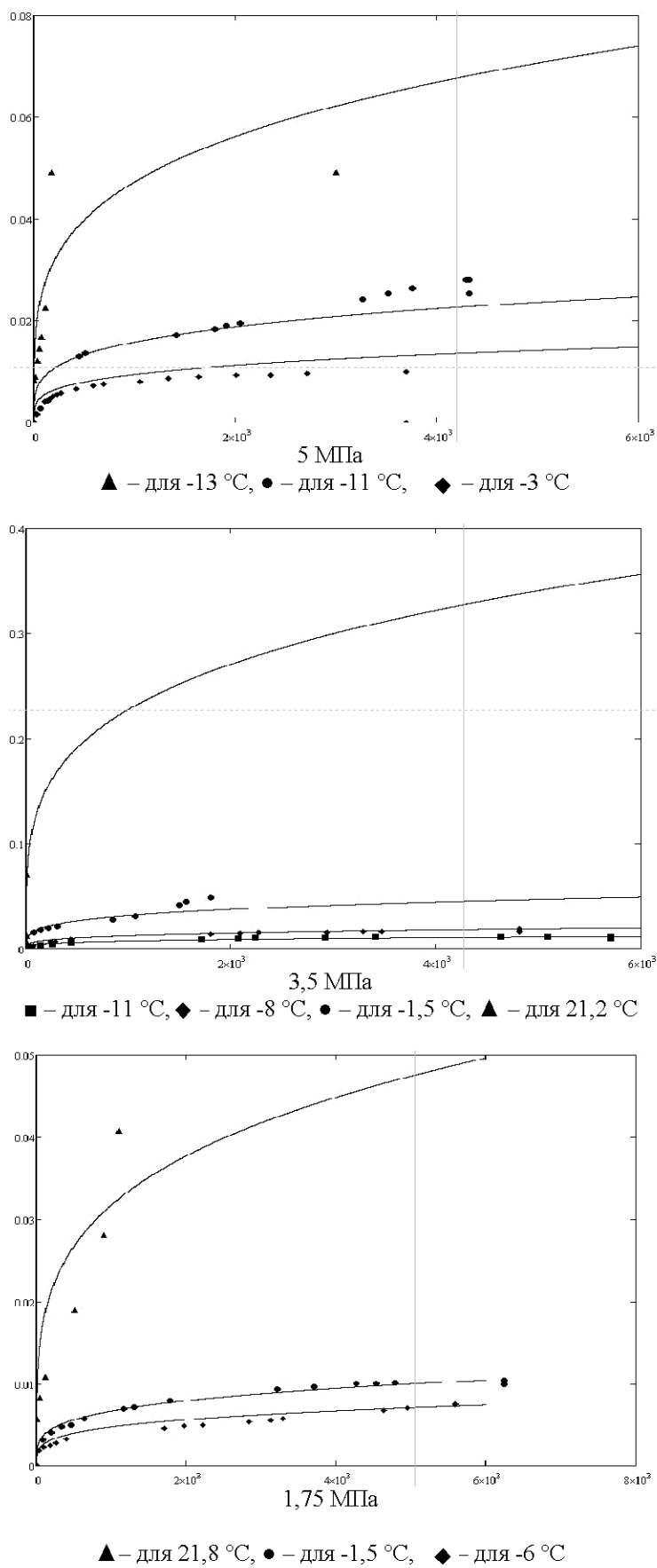


Рис. 3.

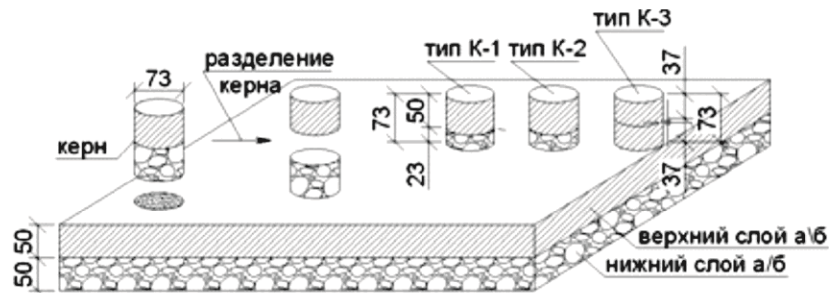


Рис. 4. Фрагмент покрытия дороги и типы образцов

Необходимо отметить, что обычная при определении характеристик старого АБ переформовка образцов не выполнялась. Это было сделано с целью сохранения микротрещин и повреждений, накопившихся в АБ в процессе его эксплуатации, т.к. при переформовке эти дефекты устраняются. Поэтому было принято решение взять керны из участка дороги с помощью установки алмазного бурения REMS Picus S1, с внутренним диаметром бура около 73 мм. Охлаждение осуществлялось за счет подачи воды при бурении.

Для сравнения кривых ползучести необходимо было получить образцы старого а/б с размерами, сходными с размерами стандартных образцов из нового а/б. Высоты слоя 0,05 м было недостаточно. Вследствие этого было принято решение получить необходимую толщину образца, склеивая его из двух заранее отделённых от керна верхних слоёв. Всего рассматривались 3 типа образцов (рис. 4):

- Тип К-1 – образец, полученный из первоначального керна путём удаления его нижней части для придания ему высоты 73 мм.
- Тип К-2 – образец, полученный также, как и К-1, но два слоя искусственным путем разделялись, а затем склеивались.
- Тип К-3 – образец высотой 73 мм, полученный из двух склеенных верхних слоёв одинаковой толщины.

Образцы К-1 и К-2 отличаются друг от друга только наличием клеевого шва и сделаны с целью определения степени его влияния на кривую ползучести. В качестве связующего материала для шва использовался резиновый клей 88 (в составе содержатся синтетические каучуки и смолы). Предполагалось, что клей обеспечит передачу касательных напряжений и при этом не внесёт значительных изменений в картину ползучести, поскольку толщина клеевого слоя составляет всего несколько микрон. Для подтверждения этого было сделано по 5 образцов типа К-1 и К-2. К образцам прикладывалась нагрузка в 1,75 МПа при температуре 23 °С. Кривые ползучести показаны на рис. 5 со следующими обозначениями: - - - - образцы К-2, ······ – образцы К-1. Установлено, что несмотря на то, что имеется разброс результатов испытаний, они являются характерными для образцов К-1 и К-2.

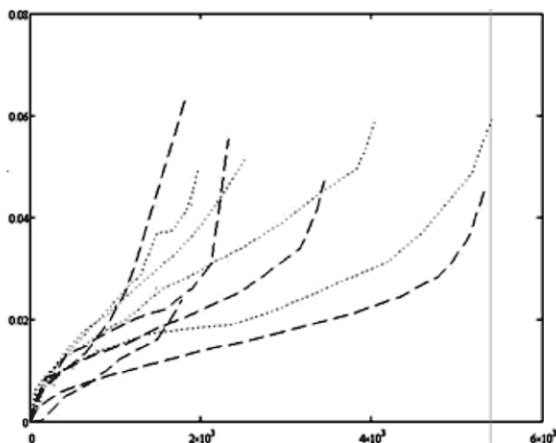


Рис. 5

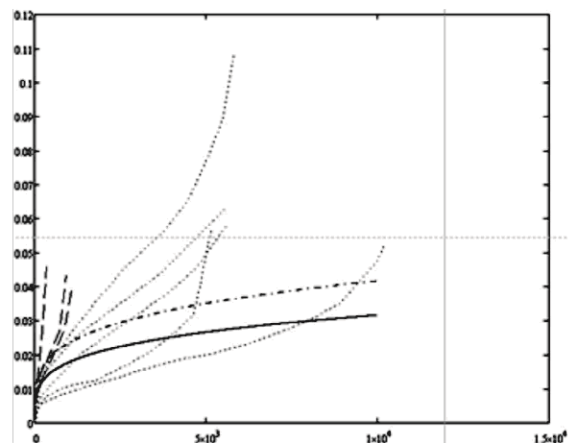


Рис. 6

Неравномерность показаний можно объяснить неравномерностью старения и сложностями, возникшими при центровке образцов, полученных из старого асфальтобетона, во время их нагружения, поскольку полученные образцы все же несколько отличаются от образцов, предусмотренных стандартами. Таким образом, можно принять, что клеевой шов практически не оказывает влияния на полученные результаты.

К образцам типа К-3 была приложена нагрузка 1,75 МПа при температуре  $23 \pm 1$  °С. Результаты испытаний показаны на рис. 6, со следующими обозначениями:  $\cdots\cdots$  – результаты для К-3,  $-\ - - -$  – результаты испытаний нового а/б,  $\underline{\quad}$  – среднее значение ползучести образцов К-3, описываемой с помощью (2) при 23 °С,  $-\cdot-\cdot-\cdot-$  – ползучесть, описываемая (2) для нового а/б при 23 °С. Из данных, приведённых на рис. 6, следует, что ползучесть старого а/б составляет 76 % ползучести нового. Поэтому при расчёте релаксации напряжений старого а/б следует это учитывать, например, вводя коэффициент старения  $k_c = 0,76$  в уравнение (2).

### Длительная прочность асфальтобетона

Как упоминалось выше, для описания температурного нагружения АБ покрытий необходимо использовать теорию длительной прочности. Описания результатов исследований длительной прочности АБ содержатся, в частности, в работах [7, 8, 9]. В упомянутых работах рассматривается в основном два вида уравнений. Первое – уравнение С.Н. Журкова, предложенное им для описания длительной прочности твердых тел и представляющее собой экспоненциальную зависимость долговечности и от температуры, и от напряжений:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (3)$$

где  $\tau$  – долговечность материала, при действии постоянного напряжения  $\sigma$ , с;

$T$  – температура, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ;

$\tau_0$  – постоянная, соответствующая периоду колебания кинетических единиц ( $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-13}$  с);

$u_0$  – эффективная энергия активации процесса разрушения,  $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ ;

$\gamma$  – структурный коэффициент, характеризующий резкость снижения энергии активации разрушения с увеличением напряжений,  $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{МПа}}$ .

Второе – уравнение Г.М. Бартенева, представляющее собой степенную зависимость долговечности от напряжений, и экспоненциальную от температуры:

$$\tau = C\sigma^{-B} \exp\left(\frac{u}{RT}\right), \quad (4)$$

где  $C$  – константа, зависящая от структуры асфальтобетона;

$B$  – коэффициент, величина которого зависит от изменений битумных пленок при деформировании.

Поскольку описание ползучести проводилось на примере АБ класса Б-І, то для описания длительной прочности покрытия можно использовать данные из работы [8], где приведены результаты для АБ класса Б-І в интервале температур от 0 °С до -40 °С. Это позволит в дальнейшем прогнозировать изменение НДС покрытия в области отрицательных температур, являющихся наиболее опасными в отношении трещинообразования. По результатам [8] ползучесть в указанном температурном диапазоне описывается с удовлетворительной точностью уравнением (3), при коэффициентах, принимающих следующие значения:  $R = 8,31 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ;  $u_0 = 89,85 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ ;  $\gamma = 60,58 \cdot 10^{-1} \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{МПа}}$ ;  $\tau_0 = 10^{-13}$  с. Из уравнения (3) очевидно, что при уровне напряжений  $\sigma = 14,8 \text{ МПа}$  долговечность не зависит от температуры. График долговечности в полулогарифмических координатах  $\lg \tau \leftrightarrow \sigma$  при различных температурах показан на рис. 7.

Согласно [10] средняя прочность для а/б марки І и ІІ на растяжение при расколе в климатических зонах І, ІІ или ІІІ составляет 4,5 МПа при 0 °С. Из рис. 7 и уравнения (3) можно

видеть, что при указанном напряжении долговечность материала будет составлять около 0,1 с, т.е. разрушение произойдет практически мгновенно. Данное сравнение показывает, что результаты исследований а/б класса Б-I в работе [8] можно считать соответствующими нормативным значениям условно мгновенной прочности а/б того же класса.

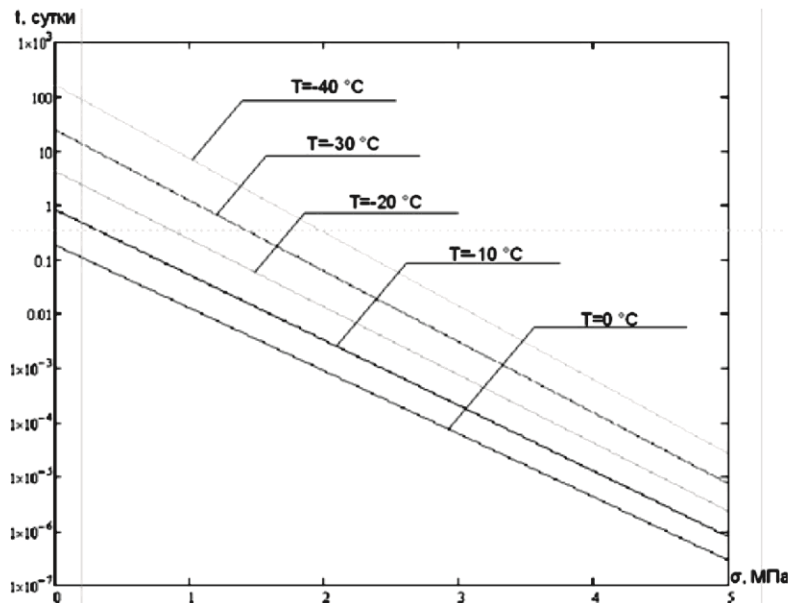


Рис. 7.

Так как уравнение (3) описывает долговечность твердого тела, то оно обычно применяется для АБ при температурах ниже 0 °С или при температурах ниже температуры стеклования АБ. При положительных температурах более точно долговечность описывает уравнение (4), как показано в [7]. Однако, исходя из того, что появление трещин ожидается в области отрицательных температур, а при положительных температурах больших значений достигает степень релаксации напряжений, можно считать точность описания долговечности АБ при положительных температурах менее важной. Кроме того, в работе [7] был проведен анализ долговечности песчаного АБ в интервале температур от -15 °С до +50 °С, в результате чего было получено уравнение, описывающее долговечность, имеющее следующий вид:

$$\tau = 5,9 \cdot 10^{-29} \cdot \sigma^{-(1,8+0,2\sigma)} \exp\left(\frac{43,2}{RT}\right). \quad (5)$$

В уравнении (5) напряжения  $\sigma$  принимаются в  $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ , а долговечность получается в секундах. Из того, что долговечность описывается одним уравнением (5), и из рис. 8, где показан закон изменения долговечности при изменении температуры, при различных постоянных напряжениях, можно видеть, что при переходе через 0 °С закон изменения долговечности в зависимости от температуры не меняется. С учетом отсутствия других экспериментальных данных это дает основание экстраполировать результаты для описания долговечности АБ, полученные в [8], на область положительных температур, где точность её описания не так важна.

#### Выводы:

1. Для описания ползучести а/б можно использовать теорию упрочнения, имеющую то преимущество перед наследственной теорией ползучести, что зависимость деформаций от напряжений и температуры выражается в явном виде.

2. За семилетний период эксплуатации способность исследованного а/б к деформациям ползучести снизилась на 24 %, соответственно этому уменьшится и способность к релаксации напряжений.

3. В первом приближении для всего интервала температур, воздействию которых подвергается покрытие моста, при описании длительной прочности а/б можно использовать уравнение Журкова, с коэффициентами, определенными в [8].

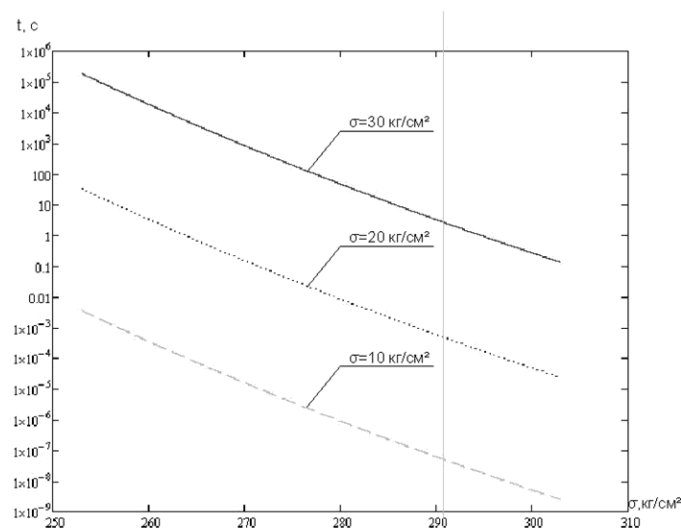


Рис. 8.

### Список литературы

1. Гришин И.В., Каюмов Р.А., Иванов Г.П. К расчету покрытий металлических мостов с ортотропной плитой на температурные воздействия // Известия КГАСУ, 2011, № 3 (17). – С. 171-178.
2. Гришин И.В., Каюмов Р.А., Иванов Г.П. К определению температурного поля в покрытии металлического моста с ортотропной плитой // Известия КГАСУ, 2012, № 3 (21). – С. 156-166.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
4. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
5. Гезенцевей А.Б. Асфальтовый бетон. – М.: Стройиздат, 1964. – 448 с.
6. Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. – М.: Транспорт, 1973. – 260 с.
7. Кирюхин Г.Н. К вопросу долговременной прочности асфальтобетона // Труды СОЮЗДОРНИИ, Вып. 113. – М., 1979. – С. 31-38.
8. Никольский Ю.Е., Писклин В.М., Шестаков В.Н. О долговременной прочности асфальтобетона в интервале температур от 233 до 273 К // Повышение эффективности применения цементных и асфальтовых бетонов в Сибири: межвуз. сб. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1979. – С. 10-17.
9. Ярцев В.П., Киселева А.О. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 124 с.
10. ГОСТ 9128-97. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. – М., 1991. – 15 с.

Grishyn I.V. – post-graduate student

E-mail: il6357@yandex.ru

Kayumov R.A. – doctor of physic-mathematical sciences, professor

E-mail: kayumov@rambler.ru

Ivanov G.P. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: ivanovGPI@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1



## Experimental research of asphaltic concrete rheological properties at different temperatures

### Resume

This paper, that is a part of a bigger research of temperature influence on the asphaltic bridge pavement stressed state and cracking, represents a research of asphaltic concrete creep and creep rupture strength. This caused by a long term acting of a temperature stresses, appearing in asphaltic concrete pavements. The study of creep was issued by executing experiment, where asphalt specimens were subjected to constant compression stress at different temperatures, and by description of obtained creep curves by equations of so called strengthening theory. Also material ageing was counted by comparing creep curves of new and aged asphalt. Further these equations will allow to consider stress relaxation in pavements. Creep rupture strength was observed based on the results of other authors. Accordingly to this observation a well known Zhurkov equation was selected for the accepted class of asphaltic concrete. Next creep and creep rupture strength equations have to be applied to some engineering model of asphaltic concrete pavement.

**Keywords:** asphaltic concrete, creep, relaxation, ageing, creep rupture strength.

### References

1. Grishyn I.V., Kayumov R.A., Ivanov G.P. About stressed state computation of steel bridge asphaltic pavement laid on orthotropic slab // News of the KSUAE, 2011, № 3 (17). – P. 171-178.
2. Grishyn I.V., Kayumov R.A., Ivanov G.P. About definition of temperature field in pavement of steel bridge with orthotropic slab // News of the KSUAE, 2011, № 3 (21). – P. 156-166.
3. Malinin N.N. Applied theory of plasticity. – M.: Mashinostroeniye, 1975. – 400 p.
4. Rabotnov Y.N. Creep of construction elements. – M.: Nauka, 1966. – 752 p.
5. Gezenvey L.B. Asphaltic concrete. – M.: Stroyizdat, 1964. – 448 p.
6. Kolbanovskaya A.S., Michaylov V.V. Road bitumens. – M.: Transport, 1973. – 260 p.
7. Kiryuchin G.N. About asphaltic concrete creep rupture strength // Trudi SOYUZDORNII, Vol. 113. – M., 1979. – P. 31-38.
8. Nickolskiy Y.E., Pisklin V.M., Shestakov V.N. About asphaltic concrete creep rupture strength in temperature interval from 233 to 273 K // Increasing of cement and asphaltic concrete using effectiveness in Siberia: interun. col. – Omsk: SibADI, 1979. – P. 10-17.
9. Yareev V.P., Kiseleva A.O. Prediction of construction materials behavior under severe exploitation conditions. – Tambov: TGTU, 2009. – 124 p.
10. GOST 9128-97. Asphaltic concrete mixtures for roads and aerodromes and asphaltic concrete. – M., 1991. – 15 p.