

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА: МОДУЛЬ ЖЕСТКОСТИ И ТРЕХОСНОЕ ЦИКЛИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ

(Продолжение. Начало в № 45)

В первой части статьи были рассмотрены методы уплотнения асфальтобетонных образцов в лаборатории, дан сравнительный анализ различных способов изготовления и более подробно описан метод изготовления асфальтобетонных образцов на гираторе-компакторе. В данной части речь пойдет о некоторых современных методах испытания асфальтобетона в лаборатории.

На сегодняшний день существует огромное множество методов испытаний, которые в той или иной мере отражают свойства асфальтобетона. Отечественный ГОСТ 12801 регламентирует проведение испытаний, основанных на разрушающих методах (прочность при сжатии, трещиностойкость, сдвигоустойчивость). При этом используются малые скорости нагружения образцов, которые не отражают реальных условий. Методы отечественного ГОСТа хорошо изучены, применяются для оценки свойств асфальтобетона и текущего контроля во многих дорожно-строительных лабораториях, но имеют ряд существенных недостатков:

- по показателям ГОСТ сложно сравнить преимущества и недостатки смесей различных типов (прочность у асфальтобетона типа А будет ниже прочности асфальтобетонов типа Б, В и типа Г);

- возникают трудности при оценке качества смесей с применением различных вяжущих (прочность асфальтобетона на ПБВ ниже прочности асфальтобетона на обычном и/или модифицированном битуме);

- используются разрушающие методы с низкими скоростями нагружения образцов (результаты не сопоставимы с условиями эксплуатации);

- не предусматриваются циклические методы испытания (не оценивается склонность к накоплению остаточных деформаций, усталостная долговечность);

Таким образом, специалисту нужно иметь огромный опыт, чтобы действительно понимать и правильно оценивать свойства асфальтобетона, прогнозировать его поведение в процессе эксплуатации.

Рассматривая множество современных методов испытаний, мы пришли к выводу, что, в первую очередь, необходимо знать физическую (фундаментальную) характеристику асфальтобетона – его модуль упругости (модуль жесткости). Поскольку асфальтобетон является вязкоупругим материалом и его свойства зависят от температуры, скорости нагружения, то для него нет единого значения модуля упругости, как, например, для металлов. Именно поэтому для характеристики асфальтобетона используется термин «модуль жесткости» (или просто жесткость – stiffness), который определяется так же, как и модуль упругости по отношению напряжения к деформации.

Главной целью определения значения модуля жесткости является получение информации по свойствам материалов для возможности определения реакций напряжения-деформации в структуре дорожного покрытия под действием прилагаемой нагрузки. В то же время жесткость не является мерой прочности: асфальтобетонная смесь с высоким модулем жесткости не обязательно будет обладать высокой прочностью и долговечностью. Высокое значение жесткости указывает на то, что данное напряжение в асфальтобетоне обуславливает низкую деформацию, но это все еще не означает, что смесь имеет высокую прочность. Например, хрупкий материал (смесь, содержащая составленное вяжущее) может иметь высокое значение жесткости, но будет обладать малой прочностью и долговечностью, а очень гибкий материал (смесь на основе ПБВ) может иметь низкое значение жесткости, но значительную прочность

(устойчивость к колееобразованию и усталостную долговечность) [1].

Модуль жесткости зависит от множества факторов, в первую очередь – от свойств применяемых материалов и от конечных объемных характеристик асфальтобетона. Еще в 1970-х годах были попытки получить зависимость модуля жесткости от исходных характеристик вяжущего и объемных характеристик смеси (VMA-объем пустот в минеральной части смеси). Но все эти зависимости довольно сложны и весьма приблизительны, поскольку не полностью учитывают весь комплекс факторов, влияющий на конечный результат. Примером может служить формула 1 [2].

$$E_{ас} = E_{бум} \times \left\{ 1 + \frac{257,5 - 2,5VMA}{[n \times (VMA - 3)]} \right\}^n \quad (1)$$

где $E_{ас}$ – жесткость асфальтобетона, МПа;

VMA – объем пустот в минеральном заполнителе (пористость минерального остова), %;

$$n = 0,83 \times \log_{10} \left(\frac{4 \times 10^4}{E_{бум}} \right)$$

$E_{бум}$ – жесткость вяжущего, МПа, которая определяется по номограмме Ван дер Пола [1] при температуре T, в зависимости от температуры размягчения по КиШ, индекса пенетрации и продолжительности импульса нагрузки.

Таким образом, модуль жесткости имеет сложную зависимость от большого количества показателей, которые весьма непросто учесть; основное влияние на конечный результат оказывают жесткость, вязкость (качество) битума и объемно-весовые характеристики асфальтобетона. При этом в формуле 1

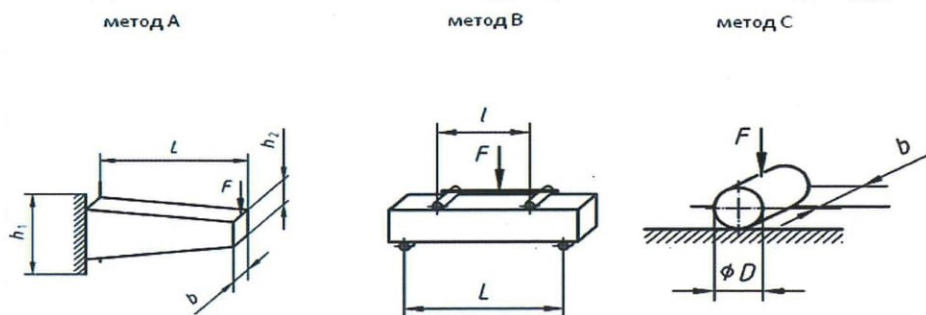


Рис. 1. Схемы испытания асфальтобетонных образцов различной формы по определению модуля жесткости: А – трапециевидный или двухточечный изгиб; В – четырехточечный изгиб; С – не прямое растяжение

не учитывается зерновой состав, содержание щебня, песка, минерального порошка и их химико-минералогический состав.

В стандарте EN 12697-26 Bituminous mixture – Test methods for hot mix asphalt – Stiffness [3] предлагается пять методов испытаний по определению модуля жесткости, которые имеют как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. Такое разнообразие связано с историческим объединением стран Европы, поскольку каждая страна имела свою материально-техническую и научную базу и вошла в Евросоюз со своими методами испытаний. Для гармонизации и создания единого документа все методы испытаний были объединены в один евростандарт, что позволило делать выбор в пользу той или иной методики, не нарушая правил и не ущемляя интересы стран Евросоюза.

В то же время анализ единого стандарта EN 12697-26 показал, что большинство методов испытаний требуют значительных энергозатрат – как на изготовление образцов (образцы в форме балочек, образцы трапециевидной формы, рис. 1), так и на их испытание.

Метод С, основанный на испытании при не прямом растяжении цилиндрического образца, был разработан в 1989 году в Великобритании К.Е. Купером и С.Ф. Брауном и получил широкое распространение в середине 1990-х. В качестве образца может быть использован керн, выпиленный из покрытия диаметром 100 или 150 мм, или образец, полученный в лаборатории. Таким образом, метод С является универсальным и наименее трудоемким, позволяет получить точный результат за короткий период времени и наиболее часто применяется для оценки свойств асфальтобетона производителями работ (подрядчиками). Кроме того, в США и Европе определение модуля жесткости по методу С применяется при решении спорных вопросов и в случае судебных разбирательств.

В работе [4], послужившей основанием для разработки и внесения метода измерения модуля жесткости при не прямом растяжении в стандарт Великобритании, а затем в единый стандарт EN, указывается высокая корреляция результатов с другими, более сложными фундаментальными методами измерения (двухточечный

изгиб на трапециевидном образце – метод А; трех-, четырехточечный изгиб – метод В, рис. 1). Также отмечается хорошая корреляция между модулем жесткости и фактическим модулем упругости, полученным при измерении динамическим прогибомером на дороге (FWD).

Стоит отметить, что жесткость, определенная любым из методов, не может быть использована напрямую, без корректировки, для анализа и проектирования дорожных покрытий. Конечно, важна температура испытания, и предпочтительно использовать температурную камеру, а образец должен термостатироваться, выдерживаться в течение нескольких часов перед проведением испытания. Однако также важна используемая скорость нагружения. Импульс нагрузки от проезжающего автомобиля до достижения максимального напряжения составляет 10–15 мс, в то время как большинство тестов, как правило, выполняются при значительно меньшей скорости. К примеру, в используемой обычно системе с пневматическим нагружателем «Ноттингемский Асфальтовый Тестер» со скоростью нагружения 125 мс (рассматриваемый нами метод С) измеренная жесткость будет только около 70% от модуля, возникающего под быстрым движением транспорта.

В табл. 1 приведены ориентировочные значения типичных модулей жесткости для нового асфальтобетона. [3]

Рассмотрим более подробно определение модуля жесткости при не прямом растяжении (метод С стандарт EN 12697-26). На рис. 2 представлен пример оборудования, позволяющего определять модуль жесткости (установка фирмы Cooper Technology). Измерения происходят следующим образом:

- образец (5) (керн или образец, полученный в лаборатории) диаметром 100 или 150 мм, должен быть подготовлен заранее, распилен до толщины от 30 до 75 мм (желательно 40–50 мм), стороны должны быть плоскопараллельными, гладкими, не содержать неровностей;
- далее образец помещается в температурную камеру, где термостатируется до достижения требуемой температуры, затем его устанавливают в испытательную рамку (7), подводят и настраивают датчики деформации с помощью регулировочных винтов (6);

Наименование материала	Модуль жесткости, МПа, при 20°C, полученный	
	в лаборатории (125 мс до пикового нагружения)	в покрытии (10 мс до пикового нагружения)
Плотный асфальтобетон на основе битума с пенетрацией 50 ед.	5000	7000
Плотный асфальтобетон на основе битума с пенетрацией 100 ед.	3500	5000
Слой износа	2000	3000
Холодная асфальтобетонная смесь	2000	2500

Табл. 1. Типичные модули жесткости (данные для нового асфальтобетона) [3]

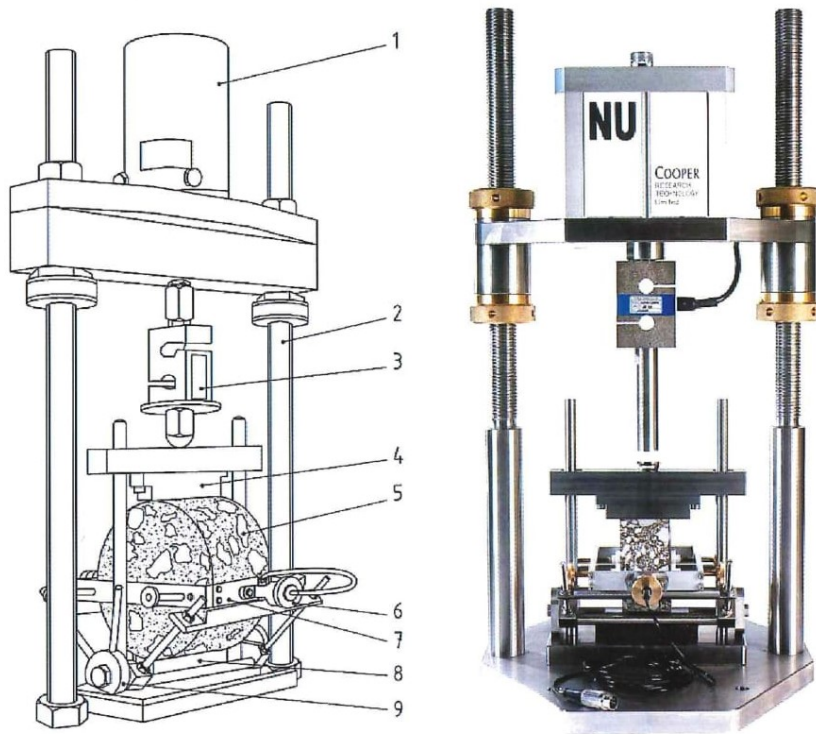


Рис. 2. Оборудование по определению модуля жесткости Cooper Technology: 1 – пневмо-актуатор; 2 – стальная рама; 3 – силоизмеритель; 4 – верхняя нагрузочная пластина; 5 – образец; 6 – регулировочный винт с датчиком деформации LVDT; 7 – установочная (испытательная) рамка; 8 – нижняя нагрузочная пластина; 9 – выравнивающий шарнир

■ пневмо-актуатор (1) создает кратковременную импульс-нагрузку (124 ± 4 мс), фиксируемую и контролируемую силоизмерителем (3), при этом боковая деформация составляет 5 мкм для образцов диаметром 100 мм и 7 мкм для образцов диаметром 150 мм;

■ установка производит десять импульсов для точной подстройки, и далее – пять нагружений, фиксируемых для расчета модуля жесткости (формула 2);

■ образец поворачивают на 90° и проводят второе испытание, за результат принимают среднее значение, полученное между двумя испытаниями.

$$S_m = \frac{F \times (v + 0.27)}{(z \times h)} \quad (2)$$

где S_m – измеренный модуль жесткости, МПа;

F – пиковое значение прилагаемой вертикальной нагрузки, Н;

z – горизонтальная деформация, мм;

h – толщина образца, мм;

v – коэффициент Пуассона, $v = 0,35$.

Удобство работы с приведенным выше оборудованием заключается в том, что система является универсальной и позволяет проводить ряд дополни-

тельных испытаний – определение ползучести при циклическом нагружении при одноосном и трехосном сжатии (EN 12697-25 [5]), испытание на усталостную долговечность при непрямом растяжении (EN 12697-24 [6]). Особо следует отметить испытание на ползучесть при трехосном сжатии и циклическом нагружении, которое позволяет более точно воспроизводить реальные напряжения, происходящие в покрытии, а получаемые данные хорошо коррелируют с испытанием на колееустойчивость на приборе Wheel Tracker и фактическим колееобразованием (коэффициент корреляции 0,94; 0,99) [3;7].

На рис. 3 представлена трехосная система испытания на ползучесть при циклическом нагружении в собранном виде. В камере (2) при помощи компрессора (5) создается постоянное, всестороннее, удерживающее давление (4) на образец асфальтобетона (3), при этом через штангу (1) передается циклическая нагрузка и датчики фиксируют деформацию образца. Температурные режимы, количество циклов, форма импульса, величина нагрузки и удерживающего давления могут варьироваться в зависимости от назначения испытываемого материала.

Сопротивление деформации асфальтобетонной смеси определяется исходя из анализа графика изменения относительной деформации (кривая ползучести, рисунок 4), полученного в ходе испытания, и рассчитывается двумя способами через:

■ скорость ползучести f_c – увеличение деформации за один цикл нагружения, вычисляется по линейной зависимости (3):

$$\epsilon_n = A_1 + B_1 \times n \quad (3)$$

где ϵ_n – суммарная осевая деформация образца после n приложений нагрузки, %;

A_1 – это относительная деформация до начала стадии ползучести или деформация на стадии доуплотнения;

B_1 – это и есть скорость ползучести, но для удобства рассчитываемая в микродеформации ($1\% = 10000$ мкдеф), т. е. $f_c = B_1 \cdot 10^4$.

■ степень B и расчетная деформация за тысячу циклов нагружения ϵ_{1000} , calc рассчитываются, исходя из степенной зависимости по формуле (4; 5);

$$\epsilon_n = A \times n^B \quad (4)$$

или по формуле

$$\log \epsilon_n = \log A + B \log n \quad (5)$$

где ϵ_n – суммарная осевая деформация образца после n приложений нагрузки, %;

B – это степень (энергия), полученная из наименьшей квадратичной степенной аппроксимации, или наклон (угловой коэффициент) из наименьшей квадратичной линейной аппроксимации в логарифмических координатах.

Второй метод расчета является предпочтительным, поскольку наиболее точно описывает кривую ползучести.

В центральной лаборатории ЗАО «ВАД» проводятся испытания асфальтобетона и различные эксперименты с определением модуля жесткости и ползучести при трехосной схеме нагружения. В табл. 2 приведены результаты испытания асфальтобетона тип А идентичного (оптимального, жесткого) зернового состава,

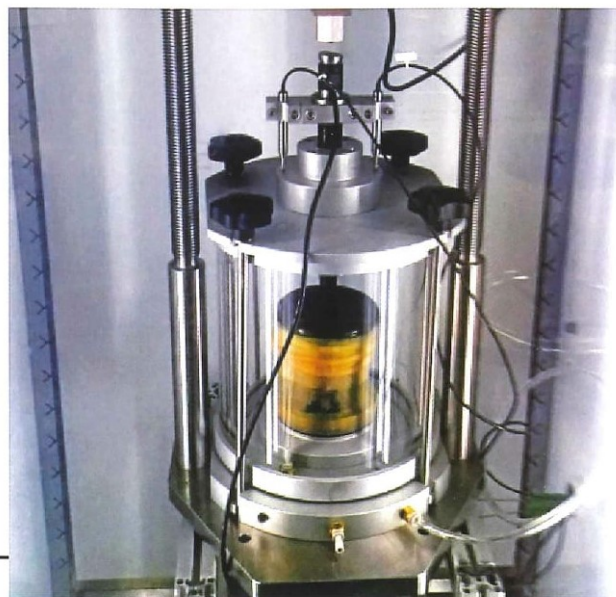
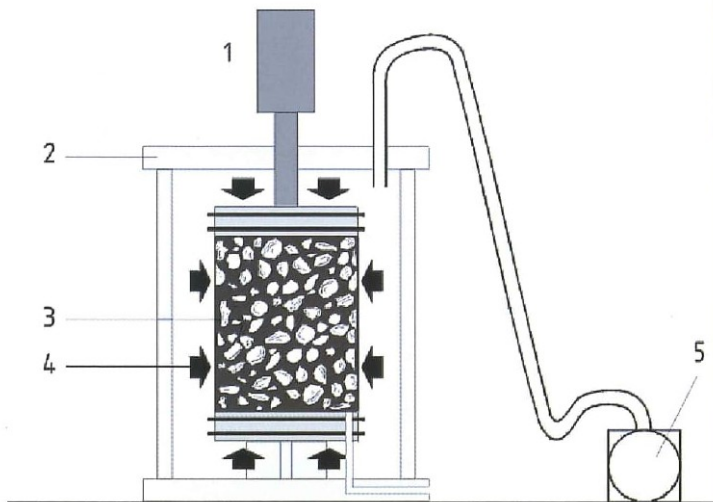


Рис. 3. Трехосная система испытания на ползучесть при циклическом нагружении: 1 – нагружающая штанга с силоизмерителем; 2 – испытательная камера; 3 – образцы асфальтобетона; 4 – всестороннее давление; 5 – компрессор

но с применением различных вяжущих и модификаторов. Получаемые данные позволяют проводить анализ, оценивать и делать выбор в сторону применения чистого битума, различных модификаторов или полимернобитумных вяжущих материалов для улучшения свойств асфальтобетона. К примеру, из данных табл. 2 видно, что устойчивость к колебанию асфальтобетона на ПБВ «Альфабит» и «Технониколь» значитель-

но выше (в 2,5–3 раза), чем у асфальтобетона на чистом битуме (см. скорость ползучести и степень В).

Отдельно следует отметить, что для чистых вяжущих выполняется условие роста модуля жесткости с увеличением плотности асфальтобетона. Данный факт свидетельствует о важности качества уплотнения асфальтобетонных слоев для повышения общей несущей

способности всей конструкции дорожной одежды. В [1] отмечается, что увеличение жесткости за счет уплотнения снижает напряжение и деформацию в нижележащих слоях и увеличивает устойчивую долговечность.

Возможность проведения испытаний при различных температурах позволяет построить кривые зависимости модуля жесткости от температуры и таким об-

№	Наименование материала	Плотность, г/см ³	Водонасыщение, %	Кол-во оборотов в гираторе	Модуль жесткости, МПа	Скорость ползучести f_c , мкдеф за один цикл нагружения	Относительная деформация при ползучести, $\epsilon_n = A \cdot n^B \cdot \text{Log } \epsilon_n = \text{Log } A + B \cdot \text{Log } n$	
							Степень Энергия (В)	Расчетная деформация, Е1000, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Тип А на БНД 60/90 Москва	2,648	2,7	120	2474	0,1300	0,1506	0,34
		2,668	2,1	200	3073			
2	Тип А на БДУ 70/100	2,652	2,6	120	2918	0,1133	0,1123	0,36
		2,694	1,4	200	3698			
3	Тип А на имп. битуме Nynas	2,689	1,4	120	2993	0,0826	0,0710	0,45
		2,707	0,8	200	3477			
4	Тип А БНД 60/90 + 0,3% PRplast	2,684	1,2	120	3179	0,0742	0,0794	0,37
		2,705	0,7	200	3600			
5	Тип А на ПБВ60 «Технониколь»	2,643	2,4	120	1670	0,0655	0,0622	0,41
		2,679	1,5	200	1640			
6	Тип А на ПБВ60 «Альфабит»	2,636	2,9	120	1740	0,0535	0,0556	0,40
		2,661	2,2	200	1745			

Табл. 2. Сравнение свойств асфальтобетона типа А с оптимальным (жестким) зерновым составом с применением различных органических вяжущих и модифицирующих добавок

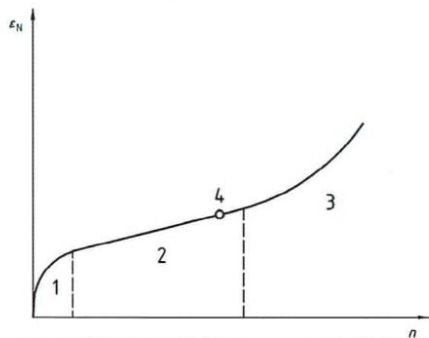


Рис. 4. – Пример графика кривой ползучести: 1 – стадия доуплотнения; 2 – стадия ползучести; 3 – стадия разрушения; 4 – переходная точка

разом определить его поведение в широком диапазоне. На рис. 5 приведены кривые зависимости изменения модуля жесткости от температуры щебеночно-мастичного асфальтобетона на основе полимернубитумного вяжущего ПБВ 60 производства ТНК «Альфабит» и модифицированного битума марки БНД 60/90 с применением модификатора Honeywell HON 7686 (окисленный полиэтиленовый воск низкого давления).

Из приведенных на рис. 5 зависимостей видно, что модуль жесткости ШМА на основе модифицированного битума с понижением температуры растет линейно, а жесткость ШМА на основе ПБВ плавно увеличивается по более сложной зависимости. Это свидетельствует о работе полимера и о лучшей устойчивости

асфальтобетона к восприятию нагрузок при низких температурах (т. е. асфальтобетон на ПБВ будет более гибким). При этом с понижением температуры происходит постепенное сближение кривых модулей жесткости, и при определенных минимально-низких критических температурах асфальтобетона на ПБВ и на модифицированном битуме будут работать одинаково (в данном случае, согласно представленным зависимостям, вычисленная температура слияния кривых изменения модуля жесткости составит минус 22°C). Таким образом, показано явное преимущество работы полимерасфальтобетона при низких эксплуатационных температурах. В то же время, при достижении определенной критической минимальной температуры асфальтобетона будут одинаково жестко воспринимать деформации и в равной степени подвергаться трещинообразованию.

В лаборатории ЗАО «ВАД» проводится множество различных экспериментов, результаты которых впоследствии используются на производстве. К сожалению, в рамках данной статьи невозможно описать их все. Применение современных методов испытаний позволяет нам более точно оценить качество асфальтобетона и прогнозировать его поведение в процессе эксплуатации, что дает значительные преимущества при выборе и определении оптимальных ре-

шений по использованию тех или иных материалов в каждом конкретном случае.

Д.А. Колесник,
руководитель группы исследования строительных материалов ЗАО «ВАД»;
О.С. Некрасова,
инженер-технолог (ЗАО «ВАД»)

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячие асфальтовые смеси, материалы, подбор составов смесей и строительство автомобильных дорог в северной Америке. Передовой зарубежный опыт. Национальный центр по асфальтовой технологии (NAPA), третье издание. – Росавтодор, 2009. – 411с.
2. Thom Nick. Principles of pavement engineering. – University of Nottingham, UK, 2010. – 469 p.
3. EN 12697-26:2004 Bituminous mixture – Test methods for hot mix asphalt. – Part 26: Stiffness.
4. Nunn M. E., Smith T.M. The indirect tensile stiffness modulus test: Assessment of suitability as an asphalt performance test. – Transport Research Laboratory Project Report PR/CE/140/96 Crowthorne. – August 1996.
5. EN 12697-25:2005 Bituminous mixture – Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test.
6. EN 12697-24:2004 Bituminous mixture – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.
7. Nunn M.E., Brown A. and Lawrence D. Assessment of practical tests to measure deformation resistance of asphalt // 3rd European conference on performance and durability of bituminous materials and hydraulically stabilised composites. – University of Leeds, Westwood Hall, Leeds. – April 1999.

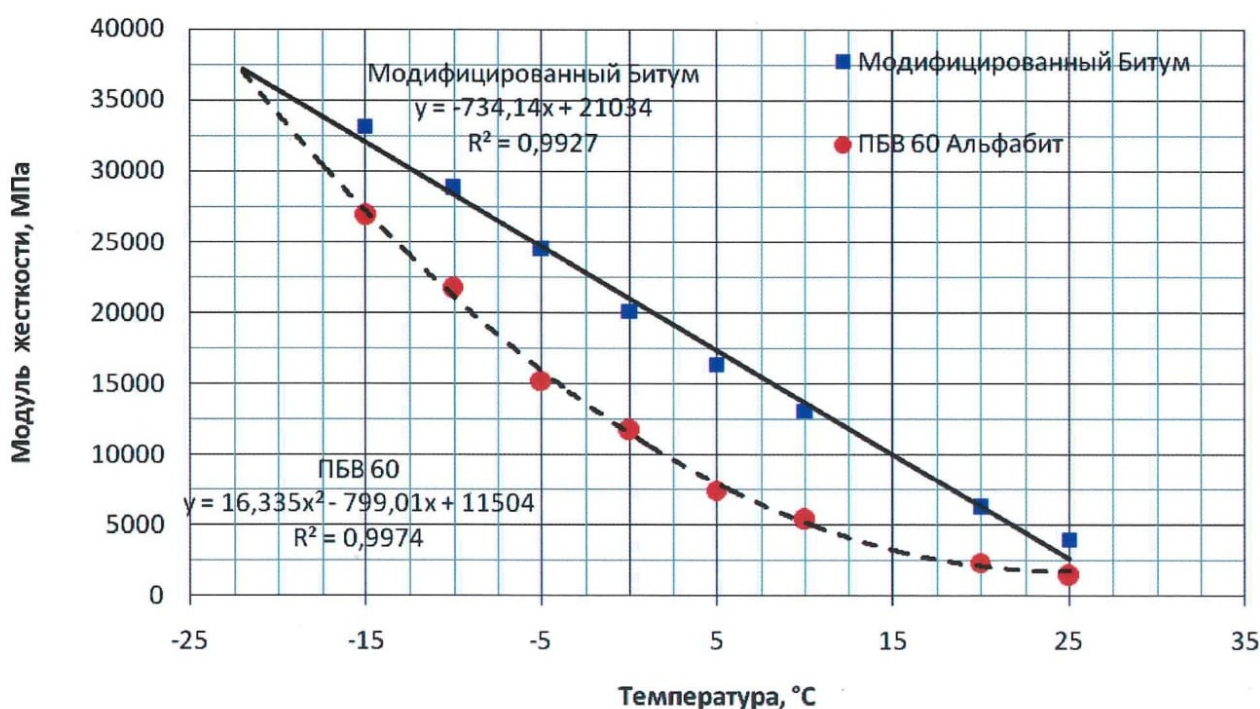


Рис. 5. Зависимость модуля жесткости от температуры