УДК 625.855.3:006.86

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТАРЕНИЯ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Канд. экон. наук, генеральный директор **Е.Н. Симчук**,
зам. руководителя ИЛ **А.В. Харпаев**,
руководитель ИЛ **И.М. Рожков**
(АНО «НИИ ТСК»)
Конт. информация: niitsk@niitsk.ru

В статье рассмотрены факторы, влияющие на старение битумных материалов, дан обзор основных, современных методов их старения. Приведены результаты исследований, проведенных при разработке стандарта на методы старения битумных вяжущих в тонком слое.
Ключевые слова: *битум, битумные вяжущие материалы, старение, методы испытания, укладка, эксплуатация, дорожное покрытие, модификация, системы объемно-функционального проектирования.*

Битум был одним из первых нефтяных продуктов, которым пользовался человек, еще за несколько столетий до нашей эры его применяли как строительный материал. Природные битумы, добываемые в районах нефтяных месторождений, использовали в качестве связующих, антисептических, противокоррозионных и водонепроницаемых материалов для строительства зданий и башен, водопроводных и водосточных каналов, водохранилищ, дорог, в судостроении, медицине и т.д. В настоящее время основными областями применения битумов являются строительство автомобильных дорог и аэродромов, а также жилых и промышленных зданий и сооружений.

Под термином «битум» понимают жидкие, полутвердые или твердые соединения углерода и водорода, содержащие небольшое количество кислорода, серы, азотсодержащих веществ и металлов, а также значительное количество асфальтосмолистых веществ, хорошо растворимых в сероуглероде, хлороформе и других органических растворителях. Битумы представляют собой сложную смесь высокомолекулярных углеводородов нефти и их гетеропроизводных, содержащих кислород, серу, азот и металлы (ванадий, железо, никель, натрий и др.). Элементарный состав битумов примерно следующий (в вес. %): углерода: 80-85; водорода: 8-11,5; кислорода: 0,2-4; серы: 0,5-7; азота: 0,2-0,5 **[1]**.

Высокие температуры, при которых происходит объединение битума с минеральными материалами, и условия погоды и климата, в которых работает битум в дорожном покрытии, вызывают изменения его химического состава и структуры, т.е. старение битума. Под старением понимается вся совокупность необратимых изменений структуры, физических и механических свойств битума, наблюдающихся при хранении, технологической переработке и эксплуатации. Старение – результат сложных структурных и химических превращений, происходящих в результате воздействия на материал различных факторов, в том числе механических нагрузок **[2]**.

Приготовление асфальтобетонной смеси на практике производится путем перемешивания битума с минеральными материалами при высокой температуре (свыше 150 °С). При этих температурах происходит взаимодействие тонкого слоя битума с кислородом воздуха, приводящее к интенсивному старению битума. Как показали исследования **[3]**, реологические характеристики битума после кратковременного пребывания его в зоне высоких температур при объединении с минеральным материалом изменяются значительно больше, чем после последующего 19-летнего нахождения в составе дорожного покрытия, где температура не превышает 70 °С. Поэтому в работах ряда исследователей подробно рассматриваются процессы старения битума при приготовлении асфальтобетонной смеси. Особое значение при старении битума в процессе эксплуатации придается пористости покрытия **[4]**. Проведенные ранее исследования показывают, что битум стареет тем больше, чем больше пористость покрытия, температура окружающей среды и тоньше слой асфальтобетона.

Старение битумов является следствием разнообразных химических реакций, протекающих между углеводородами битума и кислородом. Активаторами старения являются свет, тепло и вода. Сравнительная оценка влияния различных факторов старения на битум показала, что воздействием света, и в частности ультрафиолетовых лучей, можно пренебречь вследствие того, что толщина слоя вяжущего в покрытии, подвергающегося их действию, незначительна по сравнению с толщиной слоя, на который влияют другие атмосферные факторы **[5]**.

Под воздействием активирующих старение факторов химический групповой состав битумных материалов претерпевает изменения. Так масла превращаются в смолы, а смолы, в свою очередь, в асфальтены. Но сам процесс превращения масел в смолы идет значительно медленнее, чем превращение смол в асфальтены, следовательно, с течением времени в битумных материалах увеличивается именно содержание асфальтенов. Одновременно с этим, содержание смол, придающих битумным матери-

алам пластичность и способность к растяжению, со временем сокращается. По мере увеличения содержания асфальтенов в битумном вяжущем материале теряются его пластические свойства и возрастает хрупкость.

Старение битума влечет за собой изменение свойств асфальтобетона, что снижает эксплуатационные качества дорожного покрытия. С течением времени увеличивается хрупкость битумного вяжущего, что в свою очередь делает асфальтобетон материалом, теряющим свою способность противостоять возникающим растягивающим напряжениям. В этом случае в асфальтобетонном покрытии при резком понижении температуры воздуха в зимнее время наблюдается образование низкотемпературных трещин. Одновременно с этим повышенная хрупкость асфальтобетона усиливает процесс выкрашивания, что также существенно снижает срок службы дорожного покрытия.

Старение можно исследовать непосредственно, определяя скорость взаимодействия битума с кислородом, или изучать его по изменению любого свойства, лишь бы оно изменялось достаточно заметно.

Следует отметить, что особенно важным является точное воспроизведение основных факторов старения, учитывая, что характер процесса может изменяться не только при переходе от одного фактора воздействия к другому, но также при сильном изменении его интенсивности. Поэтому в ряде работ подчеркивается значение проведения ускоренных испытаний старения в условиях строго регламентированных температур и толщин слоев **[6]**.

В настоящее время в мире продолжается поиск наиболее совершенных методик, способных моделировать изменения свойств битумных вяжущих материалов, которые происходят как на стадии приготовления асфальтобетонной смеси и асфальтобетона, так и в процессе эксплуатации дорожного покрытия.

Одной из первых методик старения, применяемой в СССР была методика, в соответствии с ГОСТ 11954-66 **[7]**. Данный стандарт применялся для оценки качества битумов до вступления в силу ГОСТ 22245-76 **[8]**. В рассматриваемом стандарте была применена методика старения битума, унаследованная из ГОСТ 2400-51 **[9]**, который в свою очередь был введен взамен общесоюзного стандарта ОСТ 7872-39 **[10]**. В соответствии с данной методикой битум, помещенный в металлическую или стеклянную чашку слоем около 1 мм, располагали в термостате, разогретом до температуры (160±0,5) °С и выдерживали при этой температуре в течение 5 ч, дальнейшие испытания производили после охлаждения битума до (25±0,5) °С. Оценка степени старения проводилась по изменению значений показателя «Глубина проникания иглы при 25 °С», температура размягчения после прогрева не нормировалась и использовалась для накопления данных.

На смену методике по ГОСТ11954-66 пришел ГОСТ 18180-72 **[11]**, который действует и в настоящее время. Этот стандарт распространяется на нефтяные битумы и устанавливает метод определения изменения массы битума после прогрева, вследствие испарения летучих компонентов или увеличения массы за счет окисления воздухом. Данный метод применяется для определения стабильности битумов при длительном хранении в условиях повышенных температур, которая оценивается по изменению температуры размягчения. Основной аппаратурой для определения потери массы в соответствии с данной методикой является: цилиндрические металлические чашки с плоским дном (внутренний диаметр чашек – (128±1) мм; высота – (15±0,5) мм; толщина стенок – (1,5±0,1) мм) либо стеклянные чашки типа ЧБН **(рис. 1)** с наружным диаметром (100±1) мм.

Основными отличиями методики старения по рассматриваемому стандарту от методики, применявшейся согласно ГОСТ 11954-66, является изменение температуры старения от 160 °С до 163 °С, а также изменение толщины слоя битума, который подвергается старению. Так, в ГОСТ 11954-66 толщина слоя битума составляла 1 мм, в то время как в ГОСТ 18180-72 толщина слоя равна 3,8 мм. Необходимо отметить, что данные методики старения не позволяют дать ответ на то, что происходит со свойствами битума в течение его жизненного цикла в составе асфальтобетонной смеси и асфальтобетона. Техническая суть испытания не менялась с 1939 года, изменился только оценочный параметр старения (пенетрацию поменяли на температуру размягчения). Кроме того, существенно была увеличена толщина слоя испытуемой пробы (практически в 4 раза), что, по нашему мнению, только снизило точность определения этого показателя за счет того, что из всего объема пробы старению подвержена только верхняя пленка, и при дальнейшем испытании результаты старения могу быть недостаточно достоверными, во многом зависящими от процесса перемешивания состаренной части пробы с несостаренным остатком.

За последние десятилетия зарубежными исследователями были предприняты многочисленные попытки сопоставить лабораторное старение битума со старением в реальных, полевых условиях. В ходе поиска наиболее подходящих методов старения были сделаны отдельные попытки применения ультрафиолета и микроволн для воздействия на битум. Но в подавляющем большинстве исследователи использовали тонкие пленки битума и печи.

Одним из первых таких методов был метод TFOT, предложенный Льюисом и Вельборном в 1940 г. **[12]**. Метод был разработан для того, чтобы различать битумы с разной способностью к потере летучих

компонентов и способностью к затвердеванию. Согласно данной методике, используют образец битума объемом 50 мл, который помещают в плоский металлический контейнер диаметром 140 мм **(рис. 2)**, толщина слоя битума при этом должна составлять 3,2 мм.

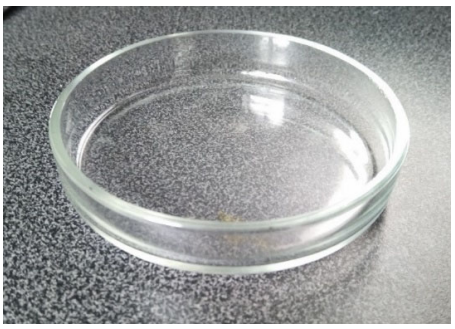

Рис. 1. Стеклянная чашка

Рис. 2. Полка с установленными контейнерами

Как минимум два контейнера помещают на вращающейся полке со скоростью вращения от 5 до 6 об/мин в печь **(рис. 3)** на 5 часов при температуре 163 °С.

Рис. 3. Печь TFOT

Метод TFOT был принят ассоциацией AASHTO в 1959 г., а затем в 1969 г. и ассоциацией ASTM (ASTM D1754 **[13]**) как метод оценки старения битума в процессе производства асфальтобетонной смеси на АБЗ. Однако основной критикой в отношении данного метода является то, что в процессе старения происходит воздействие только на поверхность слоя битума, а нижние слои остаются не подверженными окислительному процессу, так как они по-прежнему защищены верхним слоем битума. Вследствие того, что битум не перемешивается, существует опасение, что старение (главным образом летучие потери) может ограничиваться «пленкой» образца битума. В связи с обеспокоенностью из-за недостаточной эффективности данного метода старения битума в относительно толстых пленках был дан толчок для разработки или модификации метода старения битума путем уменьшения толщины пленки битума.

Один из таких примеров стал метод MTFOT – модифицированный тест в печи в тонких пленках, где пленка вяжущего была уменьшена с 3,2 мм до 100 мкм при дополнительном увеличении времени старения до 24 ч. Эти изменения метода TFOT были сделаны для того, чтобы сделать процессы старения при этом более интенсивными и включить в общее старение и затвердевание вяжущего за счет его окисления.

Еще одной вариацией на базе метода TFOT является метод Shell Microfilm Test. При испытании по данному методу очень тонкая пленка битума (толщиной 5 мкм) выдерживается в течение 2 ч на стеклянной пластине при 107 °С. Такая толщина пленки была выбрана исходя из толщины пленки битума, которая образуется на поверхности каменного материала в асфальтобетонных смесях. Оценка свойств битума производится по вязкости до и после старения для получения «индекса старения». Однако не существует достаточно подтвержденной взаимосвязи между старением в реальных, полевых условиях и лабораторном старении по данному методу, за исключением работы, выполненной в компании «Зака-Вигмор Тест» в 1969 г.

Метод Shell Microfilm Test был изменен в 1963 г. Хвимом и соавторами **[14]**. Толщину пленки битума было предложено увеличить до 20 мкм, а время старения – до 24 ч. При этом была снижена температура проведения испытания – до 99 °С. Все эти изменения показали косвенную связь между старением в полевых и лабораторных условиях.

Далее в хронологии методов старения следует уже хорошо знакомый всем метод RTFOT, который в свою очередь является наиболее значительной модификацией метода TFOT. Метод RTFOT был разработан Калифорнийским управлением автомобильных дорог (California Division of Highways). Согласно данному методу образец битума помещается в стеклянный контейнер **(рис. 4)**, который вращается в процессе старения,

что позволяет находится битуму в более тонких пленках по сравнению с TFOT, толщина пленки составляет в среднем около 1,25 мм.

Рис. 4. Стаканы из термостойкого стекла, используемые для испытаний по методу RTFOT

Старение происходит при температуре, равной 163 °С, при постоянной смене воздуха в течение 75 мин. Согласно методу RTFOT, подразумевается, что весь битум подвергается воздействию тепла и воздуха, при этом благодаря непрерывному движению гарантируется, что не происходит образования пленки на поверхности битума. Условия при испытании не являются идентичными тем, что возникают в реальных условиях, но опыт показал, что старение по методу RTFOT достаточно хорошо коррелирует с тем, что наблюдается в процессе смешения на АБЗ. Метод RTFOT был утвержден как стандарт Американским обществом по испытанию материалов (ASTM) в 1970 г. под номером ASTM D2872 **[15]**. Полагают, что метод RTFOT имитирует гораздо точнее изменения свойств битума, которые происходят во время приготовления и укладки асфальтобетонных смесей, по сравнению с ранее разработанными методами. Метод RTFOT в настоящее время является одним из основных методов старения битумных вяжущих, применяемом в передовых зарубежных странах. Тем не менее, метод RTFOT имеет ряд недостатков. Одним из таких недостатков является влияние высокой вязкости модифицированных битумных вяжущих на процесс вращения вяжущего внутри стакана в течение процесса старения. В отдельных случаях наблюдается вытекание некоторых модифицированных битумных вяжущих материалов из стаканов в процессе испытания.

Для устранения указанных недостатков 1998 г. Х. Бахия с соавторами **[16]** разработали модифицированный метод старения в тонких вращающихся пленках – RTFOTM (Modified Rolling Thin Film Oven Test). Этот метод является идентичным методу RTFOT за исключением того, что в стеклянные контейнеры во время испытания устанавливают стальные стержни диаметром 6,4 мм и длиной 127 мм. Принцип испытания по данному методу заключается в принудительном распределении высоковязкого битумного вяжущего в стакане при помощи стального стержня. Первоначальные опыты Х. Бахии показали, что применение стальных стержней не оказывает значительного влияния на физические свойства битумного вяжущего, которые определялись по значению пенетрации. Последние исследования в центре TFHRC (Turner-Fairbanks Highway Research Center) показали, что использование стальных стержней не решает проблему распределения модифицированного битумного вяжущего, и необходимы дальнейшие работы по его тестированию и проверке, прежде чем данная методика может быть применена на практике.

В России метод RTFOT регламентирован ГОСТ 33140-2014 **[17]**. Данный метод применяется как в рамках ГОСТ 33133-2014 на битумы нефтяные дорожные вязкие, так и в составе системы объемно-функционального проектирования асфальтобетона, которая является российским аналогом системы «Superpave».

В 2016 г. в лаборатории АНО «НИИ ТСК» проводилось исследование, направленное на определение влияния работы асфальтобетонного завода на эксплуатационные свойства органического вяжущего, входящего в состав асфальтобетонных смесей. В результате проведенной работы были сделаны выводы, что битумные вяжущие из смеси типа Б обладают свойствами, подобными свойствам исходного битумного вяжущего, состаренного по методу RTFOT. В то же время свойства битумного вяжущего из ЩМА отличаются от свойств битумного вяжущего, состаренного по методу RTFOT. Причем старение вяжущего в процессе производства ЩМА оказалось менее интенсивным, по сравнению с процессом старения по методу RTFOT.

Метод старения в печи с вращающимися микропленками (RMFOT) является измененным методом RTFOT. Он был разработан для того, чтобы получить гораздо более тонкие пленки битума для старения. Сущность данного метода заключается в растворении битума в бензине с последующим распределением раствора по внутренней поверхности стакана RTFOT. Затем производят выпаривание бензина. При этом на стенках стакана образуется равномерная пленка толщиной 20 мкм. Полученный таким способом образец выдерживают при температуре 99 °С в течение 24 ч. Существенным недостатком этого метода является получение состаренного материала в относительно малом количестве,

поскольку из каждого стакана RTFOT получают по 0,5 г вяжущего, что может быть недостаточно для проведения последующих испытаний.

Одним из измененных методов RTFOT является калифорнийский метод в наклонной печи (TODT) **[18]**. Согласно данному методу, печь наклонена на 1,06 °. Передняя её часть выше задней во избежание вытекания битума из стакана во время испытания. Кроме того, методом TODT устанавливается более низкая температура и длительное время старения по сравнению с методом RTFOT, а именно 168 ч старения при 113 °С. Предложенный метод старения в наибольшей степени соответствует двухлетнему периоду старения, которое происходит в дорожном покрытии, уложенном в условиях пустынного климата.

Следует отметить, что целью практически всех указанных выше зарубежных методик старения было моделирование процессов, происходящих в ходе производства и укладки асфальтобетонной смеси. Вместе с тем, очень важное значение имеет прогнозирование изменения свойств битумных вяжущих материалов, происходящих в процессе их долговременной эксплуатации.

Рассмотрим далее некоторые методы, которые были разработаны за рубежом для моделирования старения, которое происходит в процессе эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Одним из таких методов является Iowa Durability Test (IDT) **[19]**. Данный метод испытания заключается в старении вяжущего, состаренного по методу TFOT, и в старении в сосуде под давлением. Согласно условиям старения в сосуде, предполагается использование чистого кислорода и давления, равного 2,07 МПа, при температуре 65 °С. Продолжительность старения в соответствии с рассматриваемым методом составляет до 1000 ч. В связи с тем, что не предусматривается извлечение вяжущего из контейнеров TFOT перед помещением в сосуд толщина пленки составляет 3,2 мм. Было установлено, что результаты старения по методу IDT хорошо коррелируются со старением вяжущего, наблюдаемым за пятилетний период в полевых условиях **[20]**.

В 1985 г. Элдером с соавторами **[21]** был применен подход, аналогичный тому, что был использован в методе IDT. Согласно данному методу битум, подготовленный по методу RTFOT, подвергали старению в окислительном сосуде. Окислительный сосуд цилиндрической формы был выполнен из стали, а в верхней части оборудован крышкой на болтовом креплении. Внутри сосуда устанавливался стеллаж, на который горизонтально размещали 12 стеклянных пластинок размером 40х40 мм. На пластины наносили образцы слоем 30 мкм. Данный метод предполагал старение битума в течение 96 ч под давлением 2,07 МПа при температуре 65 °С.

В 2000 г. в бельгийском дорожно-исследовательском центре (Belgian Road Research Centre (BRRC)) был разработан метод Accelerated Ageing Test Device/Rotating Cylinder Ageing Test (RCAT). В данном методе применен подход подобный тому, что используется в методе RTFOT. Данный метод известен как «метод старения в устройстве укоренного старения» или как «метод старения во вращающемся цилиндре». Хотя такой метод, как RTFOT, позволяет с достаточной точностью моделировать старение, происходящее при смешивании и укладке асфальтобетонной смеси, но из-за высокой температуры испытания с его помощью невозможно достоверно моделировать старение, происходящее в процессе эксплуатации, что послужило основанием для разработки метода EN 15323 **[22]**.

Принцип работы устройства ***ускоренного старения*** RCAT подобен работе RTFOT. Устройство RCAT состоит из полого цилиндра длиной 300 мм с помещенным внутри стержнем из нержавеющей стали. Для испытания используют образец битума массой 500 г. Цилиндр с битумом вращается со скоростью 1 об/мин при подаче кислорода со скоростью 75 мл/мин. При вращении стержень распределяет битум по стенкам цилиндра в виде пленки толщиной 2 мм. Испытание проводят в печи при температурах 70 °С или 100 °С **(рис. 5)**. Через определенные промежутки времени извлекают примерно от 20 до 25 г битума для проведения испытаний. В связи с тем, что старению подвергается достаточно большое количество битума имеется возможность для выполнения оценки изменения физико-химических свойств материала в процессе старения.

Было установлено, что при температуре 85 °С и времени старения, равном 144 ч, отражается область старения, в которой происходит наиболее интенсивное образование асфальтенов. Также было отмечено, что температура менее 100 °С имеет важное значение для ускоренных испытаний на старение, при такой температуре происходят химические и реологические изменения, аналогичные тем, которые происходят в полевых условиях. Была установлена взаимосвязь между эксплуатационным старением и лабораторным старением с использованием RCAT для плотных смесей. Однако для моделирования процесса старения пористых смесей в полевых условиях требуется более 240 ч, что замедляет получение результатов при определении качества битумных вяжущих материалов.

В 1992 г. в США исследовательской группой SHRP-A-002A был разработан метод с использованием сосуда для старения под давлением (PAV) для имитации длительного окислительного старения битума в полевых условиях. Этот метод позволяет моделировать процессы старения

битумных вяжущих материалов в течение 7-10 лет их эксплуатации в дорожном покрытии. На **рис. 6** представлено оборудование, применяемое при проведении старения по методу PAV.

Рис. 5. Печь с установленным устройством ускоренного старения Rotating Cylinder Ageing Test (RCAT)

Рис. 6. Печь для старения методом PAV, с подключенным сжатым воздухом

Данный метод описывает процедуру старения битума, подготовленного методом RTFOT. Согласно данному методу, 50 г битума, подготовленного методом RTFOT, помещают в металлическую чашу диаметром 140 мм **(рис. 7)**, при этом слой битума составляет 3,2 мм.

Рис. 7. Металлическая чаша

Чаши с материалом устанавливают на стеллаж, который затем размещают внутри сосуда для старения **(рис. 8)**.

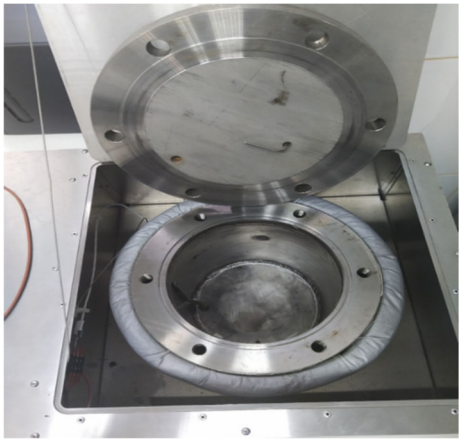

Рис. 8. Сосуд старения под давлением

Сосуд для старения закрывают, поднимают температуру внутри сосуда до температуры испытания, она составляет от 90 °С до 110 °С, давление поднимают до 2,1 МПа. Время старения составляет 20 ч. После проведения процедуры старения образцы битумного вяжущего подвергают процедуре дегазации в вакуумной дегазационной печи **(рис. 9)**.

Рис. 9. Вакуумная дегазационная печь

В 2000 г. было проведено исследование по сопоставлению методик старения PAV и RCAT. Так, исследуя реологические свойства и инфракрасный спектр материалов, было установлено, что 20 ч старения по методу PAV соответствует 178 ч старения по методу RCAT. На сегодняшний день метод старения PAV является самым широко применяемым для моделирования длительного старения, происходящего в период эксплуатации дорожного покрытия. Этот метод также хорошо зарекомендовал себя при использовании на территории Российской Федерации.

В последнее время в североамериканском институте Western Research Institute (WRI) было выполнено большое количество исследований, целью которых был поиск новых методик, направленных на сокращение расходов при их использовании. Одной из таких методик является методика старения Universal Simple Aging Test (USAT). Из истории развития методик старения известно, что идея старения в тонком слое не нова. Разработка метода USAT позволила адаптировать и углубить уже существующие исследования по старению тонкой пленки. Данный метод предназначен для моделирования в лабораторных условиях краткосрочного старения, происходящего в процессе приготовления асфальтобетонной смеси на асфальтобетонном заводе, и долговременного окислительного старения, происходящего в процессе эксплуатации дорожного покрытия. В период разработки системы «Superpave» перед разработчиками стояла задача по выбору метода, в наибольшей степени соот-

ветствующего требованиям системы. Так, предпочтение было отдано методу RTFOT, поскольку он давал возможность получать большое количество состаренного материала, необходимого для проведения дальнейших испытаний. В основном состаренный битумный материал использовался для приготовления образцов, испытываемых для определения низкотемпературных характеристик по AASHTO T313 **[23]** (метод BBR). Как уже отмечалось выше, с самого начала использования метода RTFOT возникали проблемы при старении модифицированных битумных вяжущих. В рассматриваемом методе старения применена самая новая методика с толщиной пленки вяжущего 300 мкм. Он был разработан с целью осуществления старения в качестве альтернативы как методу RTFOT, так и методу PAV. Данный метод применим ко всем видам битумных вяжущих как не модифицированных, так и модифицированных полимерами. Основное оборудование для проведения старения по данному методу включает пластины USAT, выполненные из алюминиевого сплава **(рис. 10)**, сушильный шкаф с принудительной вентиляцией и горизонтально расположенными полками.

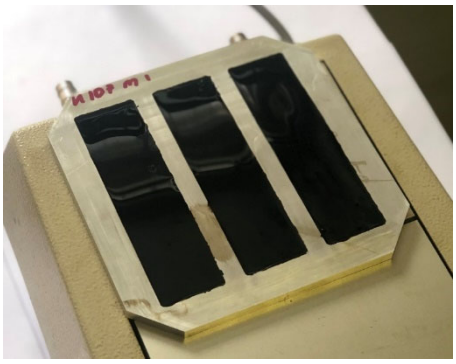

Рис. 10. Пластина для старения

В каждое углубление пластины помещают по 1 г битумного вяжущего, затем пластину помещают на плитку, разогретую до температуры 120 °С. После этого вяжущее распределяют по углублениям, и пластину устанавливают в сушильный шкаф. Для проведения краткосрочного старения битумного вяжущего применяют следующую схему: 50 мин старения в печи при 150 °С соответствует старению битумного вяжущего в горячих асфальтобетонных смесях при их производстве. По завершению этого этапа старения пластины с образцами достают из печи

и охлаждают до комнатной температуры, а затем проводят их взвешивание. Неоспоримым преимуществом данного метода перед традиционно применяемым методом RTFOT является возможность применения в качестве оборудования стандартного сушильного шкафа с принудительной вентиляцией. Согласно данной методике, существует возможность проведения процедуры моделирования долгосрочного старения двумя способами. Для этого образцы, подготовленные путем кратковременного старения, подвергают дальнейшему старению в сосуде под давлением (PAV); образцы готовят на пластинах USAT и состаривают в течение 8 ч **(рис. 11)**. При этом в связи с тем, что толщина пленки очень незначительная, последующая дегазация образца не требуется.

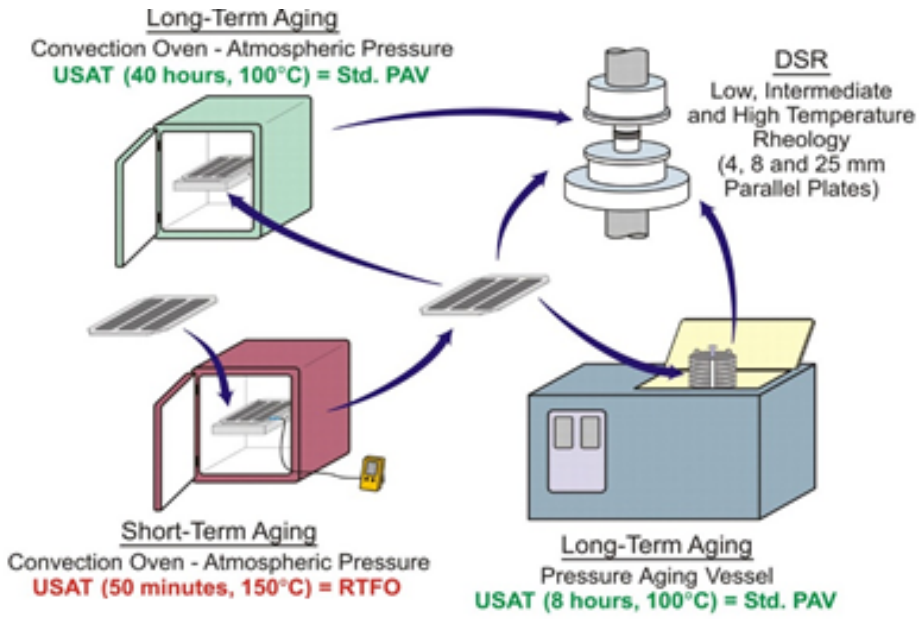

Рис. 11. Схема старения по методу USAT

Отсутствие необходимости применения дополнительного оборудования, каким, например, является печь для дегазации, становится значительным преимуществом по сравнению с традиционно применяемой методикой старения PAV. Кроме того, долговременное старение можно

выполнить в сушильном шкафу при температуре, равной 100 °С, в течение 40 ч. В связи с возможностью использования стандартного оборудования, данный метод испытаний имеет большой потенциал по применению в лабораториях дорожного хозяйства России и при необходимости может использоваться как альтернатива старению методом RTFOT, так и методом PAV. В результате применения данного метода появляется возможность сокращения времени, необходимого для проведения испытания, что в свою очередь является неоспоримым преимуществом перед традиционно применяемыми методами старения.

На основе данной методики разработан национальный стандарт ГОСТ Р 70243-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Методы старения в тонком слое» **[24]**. Необходимо отметить, что на момент разработки стандарта было неизвестно, а будет ли эта методика также точно обеспечивать моделирование процессов старения отечественных битумов. Для проведения исследований было отобрано 19 проб различных вяжущих, в том числе битум нефтяной дорожный вязкий различных марок: БНД 60/90, БНД 90/130 по ГОСТ 22245-90, БНД 50/70, БНД 70/100, БНД 100/130 по ГОСТ 33133-2014, а также пробы полимерно-битумного вяжущего различных марок по ГОСТ Р 52056-2003.

В связи с тем, что методика старения USAT включает в себя сразу несколько вариантов старения, при разработке отечественного стандарта было принято решение разделить методику на отдельные методы и дать им свои названия для удобства пользования.

Первый метод, моделирующий процессы старения в битумном вяжущем, происходящие в период с начала производства асфальтобетонной смеси до момента укладки, являющийся альтернативой методу RTFOT. Данный метод получил название – ***Упрощенное Кратковременное Старение (УСК)***. При его проведении основным оборудованием является сушильный шкаф, в котором старение происходит при атмосферном давлении в течение 50 минут при 150 °С.

Второй метод, моделирующий воздействие на битумное вяжущее в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Данный метод, являющийся альтернативным методу PAV, получил название – ***Упрощенное Долговременное Старение (УСД)***. В зависимости от применяемого оборудования старение по методу УСД можно разделить на две отдельные методики (**УСД1** и **УСД2**). Согласно методике УСД1, для моделирования старения применяется сушильный шкаф, где старение происходит при атмосферном давлении в течение 40 ч при 100 °С. В соответствии с методикой УСД2 применяется сосуд

PAV, и старение осуществляется при повышенном давлении (2,1 МПа) в течение 8 ч при 100 °С.

На первом этапе исследования образцы битумных вяжущих были подготовлены по кратковременному методу УСК (50 мин при 150 °С) и методу RTFOT. Для установления взаимосвязи между методами были определены реологические свойства битумных вяжущих, состаренных по методу RTFOT. Подготовленные образцы по методу УСК были также испытаны для определения их реологических свойств. У всех образцов битумных вяжущих были определены показатели сдвиговой устойчивости (G*/sinδ), а также дополнительно рассчитывалось значение критической температуры сдвиговой устойчивости (G*/sinδ = 2,20 кПа). Испытания проводились на реометре динамического сдвига AntonPaar SmartPave 102 **(рис. 12)**.

Рис. 12. Реометр динамического сдвига AntonPaar SmartPave 102, Австрия

В **табл. 1** представлены результаты испытаний битумных вяжущих, подготовленных по методу кратковременного старения УСК и RTFOT, по показателю «сдвиговая устойчивость» (G*/sinδ); указано расхождение результатов от среднего значения данных, полученных на образцах, подготовленных различными методами.

Таблица 1

Марка вяжущего	*Температура испытания, °С*	*УСК вяжущее, G*/sinδ, при 10 рад/с, кПа*	*RTFOT вяжущее, G*/sinδ, при 10 рад/с, кПа*	*Расхожд. от ср. знач., %*
БНД 60/90	64	3,69	3,51	2,5
	70	1,75	1,64	3,4
ПБВ 60	76	2,51	2,43	1,6
	82	1,52	1,45	2,3
ПБВ 40	76	2,61	2,45	1,3
	82	1,32	1,28	1,5
БНД 70/100	64	3,12	3,06	1,0
	70	1,51	1,57	1,9
ПБВ 60	64	3,41	3,25	2,4
	70	1,85	1,75	2,7
БНД 50/70	70	3,01	2,96	0,8
	76	1,54	1,42	4,0
БНД 60/90	64	3,31	3,18	2,0
	70	1,57	1,50	2,2
БНД 60/90	64	3,15	3,14	0,2
	70	1,49	1,47	0,7
БНД 60/90	64	2,45	2,58	2,6
	70	1,16	1,20	1,7
БНД 60/90	64	4,41	4,27	1,6
	70	2,23	2,10	3,0
ПБВ 60	64	3,78	3,67	1,5
	70	2,44	2,38	1,2
БНД 100/130	58	4,21	4,24	0,4
	64	2,02	2,12	2,4
БНД 60/90	64	2,89	3,10	4,3
	70	1,41	1,48	2,4
БНД 70/100	64	2,84	3,00	2,7
	70	1,38	1,43	1,7
БНД 60/90	64	4,06	3,81	3,2
	70	2,02	1,82	4,4
БНД 70/100	64	4,04	3,85	2,4
	70	1,88	1,84	1,1
БНД 90/130	58	4,11	3,87	3,6
	64	1,98	1,74	3,8
БНД 60/90	70	2,31	2,21	2,2
	76	1,13	1,08	2,2
БНД 50/70	64	4,44	4,63	2,1
	70	2,03	2,25	4,2

В самом методе испытаний DSR для результатов по показателю сдвиговой устойчивости материала, состаренного по методу RTFOT, установлено значение максимального расхождения от среднего значения (сходимости) на уровне 4,5 %. В ходе проведения исследования ни один из полученных результатов не превысил допустимых значений. В среднем расхождение составило 2,2 %, что более чем в два раза ниже максимально установленного требования по сходимости метода.

На **рис. 13** представлен график зависимости результатов испытаний по показателю сдвиговой устойчивости (G*/sinδ) 19 образцов битумных вяжущих, состаренных по методу RTFOT и методу УСК. Для построения графика использовались данные, полученные при одной температуре испытания для каждой пары образцов, состаренных различными методами.

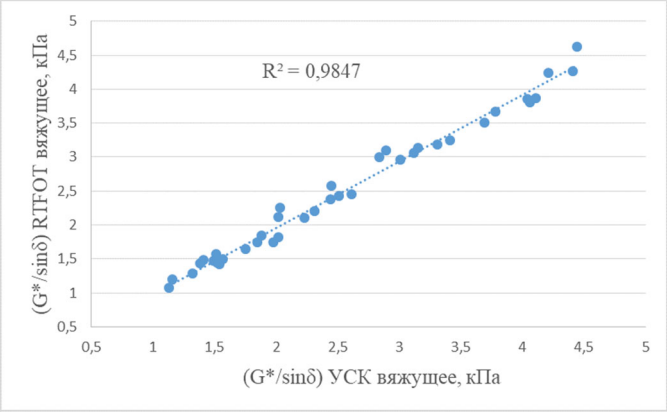

Рис. 13. Зависимость значений результатов испытаний по методу УСК и методу RTFOT

Как видно из графика, результаты, полученные в ходе испытаний образцов вяжущих, подготовленных по методу УСК и RTFOT находятся в очень высокой степени зависимости.

На следующем этапе были исследованы реологические свойства образцов битумных вяжущих, подготовленных по методу УСД2 и методу PAV. Были определены показатели усталостной устойчивости (G*·sinδ) и критическая температура усталостной устойчивости (G*·sinδ = 5000 кПа). Испытания также проводились на реометре динамического сдвига Anton Paar SmartPave 102.

В **табл. 2** представлены результаты испытаний битумных вяжущих, подготовленных по методам УСД2 и PAV, по показателю «усталостная устойчивость» (G*·sinδ) и расхождение от среднего значения результатов, полученных на образцах, подготовленных различными методами.

Таблица 2

Марка вяжущего	*Температура испытания, °С*	*УСД2 вяжущее, $G^*\cdot\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа*	*PAV вяжущее, $G^*\cdot\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа*	*Расхождение от ср. знач., %*
БНД 90/90	19	5836	5295	4,8
	22	4367	3797	6,9
ПБВ 60	7	4737	5177	4,4
	10	3375	3710	4,7
ПБВ 40	13	5825	5604	1,9
	16	4294	4143	1,8
БНД 70/100	13	5905	5304	5,4
	16	4222	4039	2,2
ПБВ 60	13	5481	5252	2,1
	16	3864	3708	2,1
БНД 50/70	19	6125	5944	1,5
	22	4412	4282	1,5
БНД 60/90	16	5421	5565	1,3
	19	3724	3876	2,0
БНД 60/90	16	6401	6616	1,7
	19	4328	4569	2,7
БНД 60/90	7	6835	6634	1,5
	10	4974	4691	2,9
БНД 60/90	13	5747	5453	2,6
	16	4388	3993	2,9
ПБВ 60	10	6583	6731	1,1
	13	4640	4814	1,8
БНД 100/130	7	5421	5182	2,3
	10	3984	3768	2,8
БНД 60/90	13	5807	5580	2,0
	16	3568	3321	3,6
БНД 70/100	16	5518	5397	2,2
	19	4017	3942	1,0
БНД 60/90	16	5861	6006	1,2
	19	4328	4471	1,6
БНД 70/100	16	5503	5923	3,7
	19	4338	4443	1,2
БНД 90/130	13	7131	6986	1,0
	16	4864	4780	0,8
БНД 60/90	19	5106	4986	1,2
	22	3712	3611	1,4
БНД 50/70	16	6183	6457	2,2
	19	4623	4808	2,0

Как видно из **табл. 2**, результаты испытаний, полученные на материалах, подготовленных по методам PAV и УСД2, очень близки по значению, а расхождение от среднего не превышает 6,9 %, установленного значения сходимости результатов испытания для метода, по которому производилось испытание. В среднем расхождение составило 2,4 %.

На **рис. 14** представлен график зависимости результатов испытаний по показателю усталостной устойчивости (G*·sinδ) 19 образцов битумных вяжущих, состаренных по методу PAV и методу УСД2. Для построения графика использовались данные, полученные при одной температуре испытания для каждой пары образцов, состаренных различными методами.

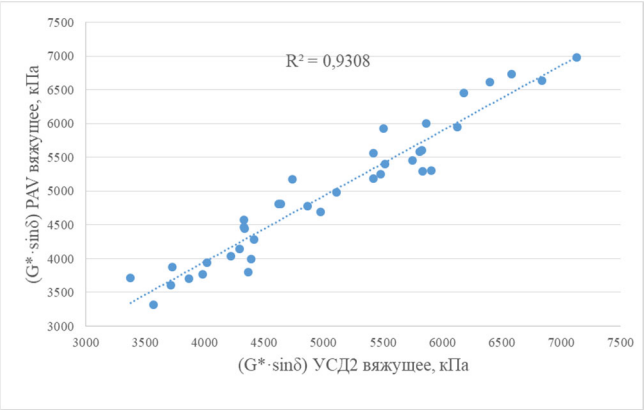

Рис. 14. Зависимость значений результатов испытаний по методу УСД2 и методу PAV

Результаты, полученные в ходе испытаний образцов вяжущих, подготовленных по методам УСД2 и PAV, также находятся в очень высокой степени зависимости.

Далее были проведены исследования и получены данные при сравнении результатов испытаний образцов, состаренных по методу УСД1 путем выдерживания в сушильном шкафу при температуре, равной 100 °С, в течение 40 ч, и по методу PAV. Для установления взаимосвязи между методами были также исследованы реологические свойства состаренных битумных вяжущих по двум методикам. Для образцов битумных вяжущих были определены показатели усталостной устойчивости (G*·sinδ), а также была рассчитана критическая температура усталостной устойчивости (G*·sinδ = 5000 кПа). Как и предыдущие испытания проводились на реометре динамического сдвига AntonPaar SmartPave 102.

В связи с тем, что испытания по методу УСД1 требуют значительно большего времени для проведения, чем испытания по другим методикам, было принято решение сократить количество испытуемых образцов до восьми, взяв различные виды материалов, отличающихся как по маркам, так и по их свойствам.

Результаты испытаний битумных вяжущих, состаренных по методам УСД1 и PAV, представлены в **табл. 3**.

Результаты испытания, представленные в **табл. 3**, полученные на материалах, подготовленных по методу PAV и методу УСД1, близки по значению, а расхождение от среднего не превышает значения сходимости результатов испытания для метода, по которому производилось испытание. В методе испытаний (DSR) для результатов испытаний по показателю усталостной устойчивости материала, состаренного по методу PAV, установлено значение максимального расхождения от среднего значения на уровне 6,9 %. В ходе проведения исследования ни один из полученных результатов не превысил значений, установленных для сходимости метода испытаний. Расхождение от среднего не превысило 5,4 %. Также необходимо отметить, что значения критических температур очень близки по значению, а максимальное расхождение составляет всего 0,9 °С.

На **рис. 15** представлен график зависимости результатов испытаний по показателю усталостной устойчивости (G*·sinδ) 8 образцов битумных вяжущих, состаренных по методу PAV и методу УСД1.

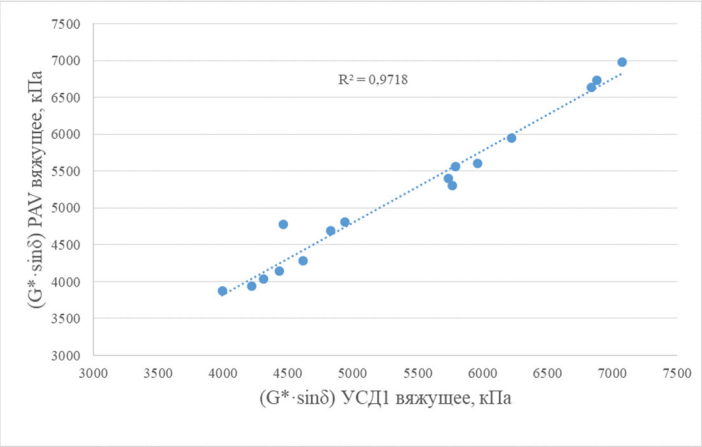

Рис. 15. Зависимость значений результатов испытаний по методу УСД1 и методу PAV.

Таблица 3

Марка вяжущего	Температура испытания, °С	УСД1 $G^*\cdot\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа	PAV $G^*\cdot\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа	Расхождение от ср. знач., %	УСД1 Крит. темп., °С ($G^*\cdot\sin\delta$ = 5000 кПа)	PAV Крит. темп., °С ($G^*\cdot\sin\delta$ = 5000 кПа)	Разность значений критических температур, °С
ПБВ 40	13	5961	5604	3,1	14,8	14,2	0,6
	16	4431	4143	4,2			
БНД 70/100	13	5764	5304	5,4	14,5	13,6	0,9
	16	4314	4039	3,3			
БНД 50/70	19	6221	5944	2,3	21,2	20,6	0,6
	22	4617	4282	3,6			
БНД 60/90	16	5789	5565	2,0	17,2	16,9	0,3
	19	3994	3876	1,5			
БНД 60/90	7	6835	6634	1,5	9,7	9,4	0,3
	10	4831	4691	1,5			
ПБВ 60	10	6883	6731	1,1	12,9	12,7	0,2
	13	4941	4814	1,3			
БНД 70/100	16	5734	5397	3,0	16,9	16,7	0,2
	19	4219	3942	2,2			
БНД 90/130	13	7073	6986	0,6	15,3	15,7	0,4
	16	4464	4780	3,4			

Полученные результаты испытаний также показали очень высокую степень зависимости.

В процессе исследований были получены интересные данные по динамике старения битума. В процессе старения по методу УСК образец одного битумного вяжущего испытывался в течение различных интервалов времени. Для оценки динамики старения были выбраны интервалы 5, 15, 30 и 50 минут, а критерием оценки был выбран показатель «сдвиговая устойчивость», получаемый на реометре динамического сдвига. Результаты испытаний битумного вяжущего, подготовленного по методу УСК, приведены в **табл. 4**.

Таблица 4

Марка вяжущего	*Время старения, мин*	*Температура испытания, °С*	*Сдвиговая устойчивость, (G*/sinδ), при 10 рад/с, кПа*	*Критическая температура сдвиговой устойчивости, °С ($G^*/\sin\delta$ = 2,2 кПа)*
БНД 70/100	5	64	1,38	60,3
	15		1,53	61,1
	30		1,91	62,9
	50		3,12	66,9

На **рис. 16** представлен график зависимости сдвиговой устойчивости от времени старения.

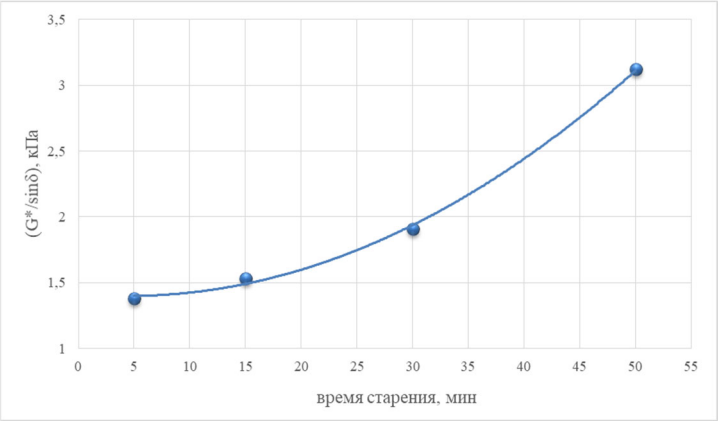

Рис. 16. График зависимости сдвиговой устойчивости от времени старения.

Как можно увидеть из графика, представленного на **рис. 16**, изменения свойств битумного вяжущего происходят постоянно, в течение всего времени старения, но скорость изменения свойств не одинакова в течение 50 мин старения, она постоянно увеличивается с увеличением времени старения.

На следующем этапе оценивалась динамика старения битума в процессе старения методом УСД. Для этого старение проводилось по методу УСД2 в течение различных интервалов времени. Для оценки динамики старения были выбраны интервалы 1, 3 и 8 ч.

Результаты испытаний битума, подготовленного по методу УСД2, приведены в **табл. 5**.

Таблица 5

Марка битума	*Время старе-ния, ч*	*Темпера-тура испы-тания, °С*	*Усталостная устойчивость, (G*·sinδ), при 10 рад/с, кПа*	*Критическая тем-пература усталостной устойчивости, °С (G*·sinδ = 5000 кПа)*
БНД 70/100	1	16	3512	13,0
	3		3830	13,6
	8		4222	14,5

На **рис. 17** представлен график зависимости усталостной устойчивости от времени старения методом УСД2.

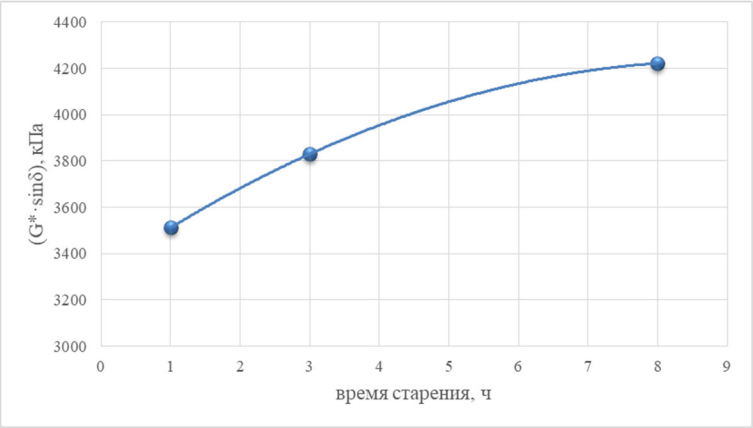

Рис. 17. График зависимости усталостной устойчивости от времени старения.

Как можно увидеть из графика, представленного на **рис. 17**, изменения свойств битумного вяжущего происходят постоянно, в течение всего времени старения, при этом скорость изменения свойств не одинакова в течение 8 ч старения, но в отличие от кратковременного старения она снижается во времени.

Завершающим этапом исследований стала оценка степени старения битумных вяжущих материалов, извлеченных из конкретных асфальтобетонных смесей, и сравнение их свойств со свойствами такого же вяжущего, но искусственно состаренного по двум методикам (УСК и RTFOT). Для решения этой задачи было произведено экстрагирование асфальтобетонных смесей при помощи асфальтоанализатора (**рис. 18**). Данная установка позволяет в короткие сроки определить состав смеси, а также получить раствор вяжущего для последующего определения остаточных свойств битумного вяжущего.

Для извлечения битумного вяжущего из раствора, полученного в результате экстрагирования асфальтобетонной смеси в асфальтоанализаторе, применялся роторный испаритель (**рис. 19**).

Рис. 18. Асфальтоанализатор InfraTest, Германия

Рис. 19. Роторный испаритель Heidolph, Германия

Принцип работы испарителя основан на понижении температуры кипения растворителя за счет создания пониженного давления при помощи вакуумного насоса. Удаление растворителя при более низкой температуре позволяет избежать побочных реакций, которые могут происходить при нагревании раствора. Испарение растворителя происходит из тонкой пленки на внутренней поверхности колбы. При этом колба постоянно вращается, обновляется поверхность испарения, и за счет этого увеличивается скорость выпаривания.

У извлеченного из асфальтобетонной смеси битумного вяжущего материала были исследованы его реологические свойства, параллельно с этим было проведено искусственное старение вяжущих, применявшихся при производстве асфальтобетонных смесей по методикам УСК и RTFOT, с последующим исследованием их реологических свойств.

В данном эксперименте были исследованы вяжущие из двух асфальтобетонных смесей: ЩМА 16 и А16ВТ, причем обе смеси были приготовлены на разных битумах одной марки.

Далее в **табл. 6** представлены результаты испытаний по определению сдвиговой устойчивости и критической температуры трех вяжущих: извлеченного из смеси ЩМА 16, а также исходного битумного вяжущего, искусственно состаренного методом RTFOT и методом УСК.

Таблица 6

Наименование показателя		*Извлеченное вяжущее ЩМА-16*	*RTFOT вяжущее*	*УСК вяжущее*
		Фактическое значение		
Сдвиговая устойчивость после старения, G/sinδ, при 10 рад/с, кПа*	*при 70 °С*	2,86	2,21	2,31
	при 76 °С	1,40	1,08	1,13
Критическая температура сдвиговой устойчивости, °С	*при G*/sinδ = 2,2 кПа*	72,2	70,0	70,4

Полученные результаты показали, что все три материала оказались схожи по реологическим свойствам. Из этого можно сделать вывод, что обе методики старения обладают сравнимой степенью воздействия на битумный материал.

Подобные результаты реологических свойств (**табл. 7**) были получены и при испытании материала из смеси А16ВТ, состаренного методом RTFOT и методом УСК.

Таблица 7

Наименование показателя		*Извлеченное вяжущее А16ВТ*	*RTFOT вяжущее*	*УСК вяжущее*
		Фактическое значение		
Сдвиговая устойчивость после старения, G/sinδ, при 10 рад/с, кПа*	*при 64 °С*	4,36	4,27	4,41
	при 70 °С	2,16	2,10	2,23
Критическая температура сдвиговой устойчивости, °С	*при G*/sinδ = 2,2 кПа*	69,8	69,6	70,1

Анализируя результаты испытаний, можно оценить, насколько точно моделируются процессы старения при помощи данных методик.

В заключение необходимо отметить, что к одним из важнейших направлений исследований можно отнести прогнозируемую оценку изменения свойств битумных вяжущих материалов в процессе эксплуатации асфальтобетонных слоев дорожных одежд. Разработанные и применяемые за рубежом, а теперь и в Российской Федерации современные методики старения в целом позволяют моделировать процессы, реально происходящие с материалом в течение его «жизненного цикла», тем самым давая возможность спрогнозировать поведение материала в процессе его эксплуатации. В дальнейшем необходимо расширить исследования в части оценки изменения свойств битумных вяжущих материалов в процессе эксплуатации автомобильных дорог с учетом применения их в различных конструктивных слоях дорожных одежд и климатических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гун Р.Б. Нефтяные битумы. – М.: Химия, 1973. – 432 с.*
2. *Каргин В.А. Проблемы науки о полимерах: избранные труды / [вступ. ст. В. А. Кабанова, П. В. Козлова; АН СССР, Научный совет по высокомолекулярным соединениям, Ин-т нефтехим. синтеза им. А.В. Топчиева]. – М.: Наука, 1986. – 277 с.*
3. *Pauels W.S. and Halstead V.N. // Public Roads. – 1959. – Vol. 30. – No. 6. – 106 p.*
4. *Meggler M.R. // Strasse und Verkehr. – 1970. – Vol. 56 – No. 6. – p. 1342.*
5. *Leroux M. // Bulletin de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route. – 1956. – P. 142-144.*
6. *Ewers N. Wissenschafiliche Zeitschr. Hoshchille für Bauwesen. – Leipzig. –1960. – Heft 1.*
7. *ГОСТ 11954-66. Битумы нефтяные дорожные вязкие улучшенные. Технические требования (с Изменением № 1). – М.: Издательство стандартов, 1976.*
8. *ГОСТ 22245-76. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). – М.: Издательство стандартов, 1989.*
9. *ГОСТ 2400-51. Битумы нефтяные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1967.*
10. *ОСТ 7872-39 М.И. 36в-39. Нефтепродукты. Методы испытаний. Определение содержания в битуме нерастворимых веществ.*
11. *ГОСТ 18180-72. Битумы нефтяные. Метод определения изменения массы после прогрева (с Изменениями N 1, 2, 3). – М.: Стандартинформ, 2009. – 4 с.*
12. *Lewis R.H. and Welborn J.Y. (1940). Report on the properties of the residues of 50-60 and 85-100 penetration asphalts from oven tests and exposure // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 11. – P. 86-157.*
13. *ASTM D1754–94. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test). – American Society for Testing and Materials, 1995. – Philadelphia, USA.*
14. *Hveem F.N., Zube E. and Skog J. (1963). Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 32. – P. 247-327.*
15. *ASTM D2872-19. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). – ASTM International, 2019.*

16. *Bahia H.U., Hislop W.P., Zhai H. and Rangel A. (1998). Classification of asphalt binders into simple and complex binders // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 67. – P. 1-41.*
17. *ГОСТ 33140-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT). – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.*
18. *Petersen J.C. (1989) A thin film accelerated aging test for evaluating asphalt oxidative aging // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 58. – P. 220-244.*
19. *Kemp G.R. and Prodoehl N.H. (1981). A comparison of field and laboratory environments on asphalt durability // Proceeding-Association of Asphalt Paving Technologists, 50. – P. 492-537.*
20. *Lee D.Y. Asphalt durability correlation in Iowa // Highway Research Record. – 1973. – 468. – P. 43-60.*
21. *Edler A.C., Hattingh M.M., Servas V.P. and Marais C.P. (1985). Use of ageing tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 54. – P. 118-139.*
22. *EN 15323-2007. Bitumen and bituminous binders - Accelerated long-term ageing/conditioning by the rotating cylinder method (RCAT). – 2007. – 24 P*
23. *AASHTO T 313-12. Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). – 2012. – 24 P.*
24. *ГОСТ Р 70243-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Методы старения в тонком слое. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 12 с.*

L I T E R A T U R A

1. *Gun R.B. Neftyanye bitumy. – M.: Himiya, 1973. – 432 s.*
2. *Kargin V.A. Problemy nauki o polimerah: izbrannye Trudy / [vstup. st. V. A. Kabanova, P. V. Kozlova; AN SSSR, Nauchnyj sovet po vysokomolekulyarnym soedineniyam, Int neftekhim. sinteza im. A.V. Topchieva]. – M.: Nauka, 1986. – 277 s.*
3. *Pauels W.S. and Halstead V.N. // Public Roads. – 1959. – Vol. 30. – No. 6. – 106 p.*
4. *Meggler M.R. // Strasse und Verkehr. – 1970. – Vol. 56 – No. 6. – P. 1342.*

5. *Leroux M. // Bulletin de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route. – 1956. – P. 142-144.*
6. *Ewers N. Wissenschafiliche Zeitschr. Hoshchille für Bauwesen.– Leipzig. –1960. – Heft 1.*
7. *GOST 11954-66. Bitumy neftyanye dorozhnye vyazkie uluchshennye. Tekhnicheskie trebovaniya (s Izmeneniem № 1). – M.: Izdatel'stvo standartov, 1976.*
8. *GOST 22245-76. Bitumy neftyanye dorozhnye vyazkie. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniyami N 1, 2). – M.: Izdatel'stvo standartov, 1989.*
9. *GOST 2400-51. Bitumy neftyanye. Metody ispytanij. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1967.*
10. *OST 7872-39 M.I. 36v-39. Nefteprodukty. Metody ispytanij. Opredelenie soderzhaniya v bitume nerastvorimyh veshchestv.*
11. *GOST 18180-72. Bitumy neftyanye. Metod opredeleniya izmeneniya massy posle progreva (s Izmeneniyami N 1, 2, 3). – M.: Standartinform, 2009. – 4 s.*
12. *Lewis R.H. and Welborn J.Y. (1940). Report on the properties of the residues of 50-60 and 85-100 penetration asphalts from oven tests and exposure // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 11. – P. 86-157.*
13. *ASTM D1754–94. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test). – American Society for Testing and Materials, 1995. – Philadelphia, USA.*
14. *Hveem F.N., Zube E. and Skog J. (1963). Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 32. – P. 247-327.*
15. *ASTM D2872-19. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). – ASTM International, 2019.*
16. *Bahia H.U., Hislop W.P., Zhai H. and Rangel A. (1998). Classification of asphalt binders into simple and complex binders // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 67. – P. 1-41.*
17. *GOST 33140-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Bitumy neftyanye dorozhnye vyazkie. Metod opredeleniya stareniya pod vozdejstviem vysokoj temperatury i vozduha (metod RTFOT). – M.: Standartinform, 2015. – 10 s.*
18. *Petersen J.C. (1989) A thin film accelerated aging test for evaluating asphalt oxidative aging // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 58. – P. 220-244.*
19. *Kemp G.R. and Prodoehl N.H. (1981). A comparison of field and laboratory environments on asphalt durability // Proceeding-Association of Asphalt Paving Technologists, 50. – P. 492-537.*

20. *Lee D.Y. Asphalt durability correlation in Iowa // Highway Research Record. – 1973. – 468. – P. 43-60.*
21. *Edler A.C., Hattingh M.M., Servas V.P. and Marais C.P. (1985). Use of ageing tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 54. – P. 118-139.*
22. *EN 15323-2007. Bitumen and bituminous binders - Accelerated long-term ageing/conditioning by the rotating cylinder method (RCAT). – 2007. – 24 P*
23. *AASHTO T 313-12. Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). – 2012. – 24 P.*
24. *GOST R 70243-2022. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Materialy vyazhushchie neftyanye bitumnye. Metody stareniya v tonkom sloe. – M.: Rossijskij institut standar-tizacii, 2022. – 12 s.*

……..

MODERN APPROACHES TO MODELING THE AGING OF BITUMEN BINDERS IN THE LABORATORY

Ph. D. (Econ.), General Director ***E.N. Simchuk***
Deputy Head of Reseach_ Laboratory ***A.V. Kharpaev***
Head of Research Laboratory ***I.M. Rozhkov***
(«NII TSK» ANO)
Contact information: niitsk@niitsk.ru

The article considers the factors influencing the aging of bituminous materials and reviews the main and advanced methods of their aging. The results of researches, which have been carried out when developing the standard for the methods of aging in a thin layer, are done.
Key words: *bitumen, bituminous binders, aging, test methods, laying, operation, pavement, modification, volume-functional design systems.*

Рецензент: канд. техн. наук М.А. Славуцкий (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 23.09.2022 г.