

## Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу СУПЕРПЕЙВ

### I. Изучение поведения асфальтобетонных покрытий

1.1. Усилия американских инженеров-дорожников направлены на предотвращение трех главных видов разрушений покрытий:

- остаточных деформаций в виде колеи, возникающих, главным образом летом (см. рис.1);

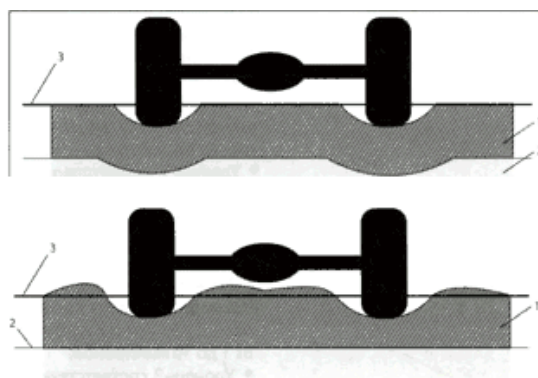


Рис.1. Колея на поверхности покрытия

А - колея, обусловленная недостаточной толщиной дорожной одежды и непрочным земляным полотном или основанием дорожной одежды; под действием повторных нагрузок поверхность покрытия опустилась так же, как поверхность основания или земляного полотна.

Б - колея, обусловленная недостаточным сопротивлением асфальтобетона действиям повторных нагрузок в жаркое время года; под "полосой наката" покрытие опустилось, а в стороне от неё - поднялось.

1 - дорожная одежда; 2 - земляное полотно; 3 - первоначальная поверхность покрытия.

- пересекающихся "усталостных трещин" в покрытии, образующихся от действия повторных нагрузок, в основном, весной и осенью, когда земляное полотно сильно увлажнено (см. рис.2);

- "низкотемпературных" поперечных трещин, возникающих при сильном охлаждении покрытия (см. рис.2).



Рис.2. Усталостные и температурные трещины на дороге местного значения

Пересекающиеся усталостные трещины по полосам наката на промежуточной стадии формирования сетки "крокодилова кожа", когда поперечные трещины уже связаны с продольными, но ещё не образуют замкнутых многоугольников; поперечные и низкотемпературные трещины пересекают всю или почти всю проезжую часть; трещины залиты горячим вязким битумом.

## II. Методы проектирования состава асфальтобетона

### Метод Хвима

2.1. В 1930-1950 годах в Калифорнии под руководством Ф.Хвима был разработан метод проектирования состава асфальтобетона. Основная концепция метода состояла в следующем:

- смесь должна содержать достаточно много битума с учетом адсорбции его части открытыми порами на поверхности минеральных зерен, чтобы все минеральные зерна были им покрыты;

- битума должно быть достаточно для обеспечения долговечности покрытия при окислительном старении и увлажнении;

- плотный зерновой состав без чрезмерного содержания мелких частиц должен обеспечивать высокое внутреннее трение и размещение достаточно большого объема битума, при этом объем воздушных пор должен быть не менее 3% (обычно 3-5%);

- асфальтобетон должен быть устойчивым к воздействию транспортных нагрузок при высокой температуре.

2.1.2. Одним предложением всю "философию" метода Ф.Хвима можно выразить следующим образом: **смесь должна содержать как можно больше битума, чтобы была обеспечена ее долговечность, но не чрезмерно много, чтобы сохранялась ее устойчивость к образованию колеи.** Метод состоит из нескольких последовательных этапов.

2.1.3. **На первом этапе** для заданного зернового состава каменного материала определяется приближенное содержание битума. При этом руководствуются расчетом удельной поверхности каменного материала и экспериментально найденным центрифуговым керосиновым эквивалентом (Centrifuge Kerosene Equivalent test - сокращенно СКЕ).

Ф.Хвим полагал, что битума должно быть достаточно, чтобы покрыть поверхность всех минеральных зерен пленкой определенной толщины, необходимой (с современной точки зрения) для обеспечения стабильности его свойств при старении, а также чтобы битум мог служить в качестве "смазки" при уплотнении смеси с целью уменьшения трения между частицами. Тогда необходимый объем битума может быть найден как произведение площади поверхности минеральных зерен на толщину пленки.

Для этого нужно знать удельную поверхность различных фракций каменного материала.

Удельная поверхность - это отношение площади поверхности частиц к их объему либо к их весу. Хвим использовал отношение к весу для плотности камня  $2,65 \text{ г/см}^3$ . Удельную поверхность минерального материала рассчитывают как сумму произведений "проходов" через стандартные сита на соответствующие этим ситам коэффициенты удельной поверхности, предложенные Ф.Хвимом.

Ф.Хвим при расчете поверхности считал зерна гладкими и шарообразными. Чтобы учесть их шероховатость, неправильность формы и способность к адсорбции части вяжущего, он разработал эксперимент по определению СКЕ. Минеральный материал, прошедший сито с отверстиями  $4,76 \text{ мм}$ , в рыхлом состоянии насыщают керосином, а затем подвергают центрифугированию в течение двух минут при скорости вращения, дающей центробежную силу, превышающую силу тяжести в 400 раз. Масса оставшегося керосина, выраженная в процентах (по массе) сухого минерального материала, и есть показатель керосинового эквивалента СКЕ.

Рассчитав удельную поверхность каменного материала и экспериментально определив керосиновый эквивалент, находят приближенное содержание битума AAC (approximate asphalt content).

Каким же минимальным размером частиц ограничился Хвим? Это не совсем ясно, поскольку последний коэффициент удельной поверхности дан для частиц диаметром меньше  $0,075 \text{ мм}$ , и он равен  $33 \text{ м}^2/\text{кг}$ . В то же время фактически измеренная удельная поверхность таких частиц, например для портландцемента, имеет порядок  $100-1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Имеются и другие неясности. Так, Ф.Хвим первоначально принимал толщину пленки одинаковой для частиц различного диаметра, но впоследствии пришел к выводу, что с уменьшением диаметра зерна толщина пленки уменьшается, однако на значениях коэффициентов удельной поверхности это не отразилось. С другой стороны, можно ли считать пленкой битумную оболочку, толщина которой во много раз больше диаметра зерна? Такое зерно естественнее рассматривать как погруженное в битум.

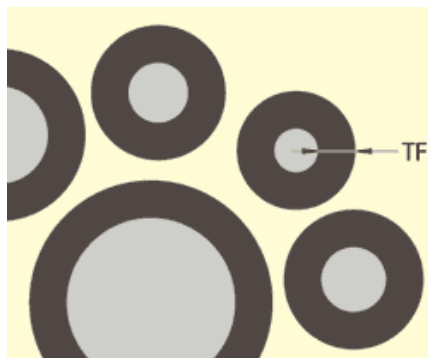


Рис.3. Иллюстрация к понятию толщины пленки битума

Асфальтобетонная смесь рассматривается, как совокупность частиц с битумными оболочками постоянной толщины TF без учета влияния уплотнения.

Как ясно из изложенного, Ф.Хвим, фактически рассматривали асфальтобетонную смесь как совокупность частиц с битумными оболочками, не соприкасающимися между собой, как если бы они висели в воздухе. Информация о степени уплотнения, об остаточной воздушной пористости или о пористости минерального остова не была задействована для расчета толщины пленки.

В действительности же окруженные битумными оболочками зерна даже в рыхлой смеси оказывают взаимное влияние на расположение друг друга, а в уплотненной могут вступать в непосредственный контакт, как показано на рис.4.

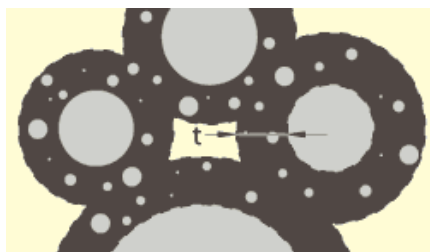


Рис.4. Иллюстрация к понятию толщины пленки битума

Частицы минерального материала, имеющие диаметр меньше толщины пленки, считаются частью вяжущего вещества. Чем выше степень уплотнения, тем толще пленка.

По Хвиму, толщина пленки равна объему битума, деленному на площадь поверхности частиц. На самом же деле она зависит от степени уплотнения смеси, поскольку по мере уплотнения зерна сближаются друг с другом, а часть битума выжимается из зоны контакта зерен. В результате, толщина пленки возрастает быстрее содержания битума. Пленкой можно назвать расстояние от поверхности зерна до воздушной поры. Например, если считать целесообразным для повышения долговечности (в частности, устойчивости к старению битума) увеличить толщину пленки вдвое - скажем, от 5,5 до 11 микрон, то для этого достаточно повысить содержание битума всего примерно на 20%, а не вдвое, как следовало бы из традиционного метода расчета толщины пленки.

Итак, первый этап метода Ф.Хвима заканчивается определением приближенного содержания битума в смеси.

2.1.4. **На втором этапе** содержание битума уточняют путем испытания образцов смеси, содержащих разное количество битума, на устойчивость при высокой температуре. Например, приближенное содержание битума найдено равным 5,5%. Тогда формируют цилиндрические образцы с содержанием битума 5,0, 5,5, 6,0 и 6,5%, то есть один с количеством битума меньше приближенного, один с найденным приближенным содержанием битума и два - с более высоким его содержанием. Если предполагается, что смесь будет очень чувствительной к изменению содержания вяжущего, то принимают приращение не 0,5, а 0,3%. Напротив, для каменного материала с очень высокой адсорбционной способностью принимают приращение в 1%.

Цилиндрические образцы асфальтобетонной смеси уплотняют (штыкуют) на механическом компакторе, а затем доуплотняют статическим нагружением. При этом следят за тем, чтобы поверхность образца по крайней мере при одном содержании битума была блестящей, что свидетельствует об избытке вяжущего. Если нужно, с этой целью готовят дополнительный образец с более высоким количеством битума. Напомним, что краеугольный камень метода Ф.Хвима: как можно больше битума, чтобы обеспечить долговечность, но не слишком много, чтобы избежать колеи. Этот подход разительно отличается от советского стремления к неременной экономии битума. Ф.Хвим понимал, что достаточное содержание битума в смеси отнюдь не гарантирует устойчивости покрытия к возникновению колеи, поэтому требуется испытать ее на способность сопротивляться сдвигу. Это привело его к изобретению прибора, который он назвал стабилметром. Первый такой прибор он сконструировал в начале 1930 года.

Цилиндрический образец уплотненной смеси либо каменного материала без битума помещали в разъемный полый металлический цилиндр. К торцу образца прикладывали вертикальную нагрузку, измеряя горизонтальное усилие, которое требовалось приложить к образцу, чтобы сдержать его боковое деформирование. В окончательном варианте прибора образец уплотненной асфальтобетонной смеси в тонкой резиновой оболочке устанавливали между верхним и нижним поршнями и помещали в герметически закрытую камеру, которую затем заполняли жидкостью. Прибор был снабжен манометром для измерения давления жидкости в камере. Прикладывая к торцам образца вертикальное продольное давление " $\sigma_z$ ", измеряли манометром горизонтальное давление " $\sigma_x$ ". На аналогичном приборе Ф.Хвим испытывал грунты и несвязные дорожно-строительные материалы.

Говоря современными терминами, величину  $R = (1 - \sigma_x / \sigma_z)$  Ф.Хвим назвал R-value (resistance value), то есть "показателем сопротивления". Очевидно, что величина R связана с известным в механике грунтов коэффициентом бокового давления  $\xi = \mu / (1 - \mu)$ , где  $\mu$  - известный из курсов сопротивления материалов и теории упругости коэффициент поперечной деформации

(коэффициент Пуассона).

Идея Ф.Хвима заключалась в следующем. Чем лучше смесь сопротивляется действию нагрузки, тем выше значение  $R$ . В частности, для идеальной жидкости справедлив закон Паскаля - горизонтальное давление равно вертикальному, то есть показатель  $R=0$ .

Если бы испытываемый образец был подобен абсолютно твердому блоку, то, по мнению Ф.Хвима, он бы воспринимал вертикальную нагрузку без бокового распора, чему соответствует  $R=1$ . Реальные материалы характеризуются промежуточными значениями  $R$ . Здесь следует напомнить, что такой пористый материал, как пенопласт, испытывает продольную деформацию при почти полном отсутствии поперечной за счет его внутренней пористости. Коэффициент Пуассона у пенопласта будет близким к нулю, то есть  $R$  получится близким к единице, хотя он далек от абсолютно твердого тела. Другими словами, как теперь ясно, рассуждения Хвима не следует считать безупречными.

Испытывают цилиндрические образцы диаметром 102 мм и высотой 64 мм при температуре 60°С и скорости вертикальной деформации 0,02 мм/мин. Полученное значение  $R$  выражают в процентах и сравнивают с требуемым значением, зависящим от интенсивности движения и состава транспортного потока. Обычно требуется обеспечить не менее  $R=35-55$  (проценты). Для сравнения, высококачественный щебень для основания дорожной одежды характеризуется  $R=70-75$ , щебеночный материал для дополнительного основания имеет  $R=40-60$ , а грунт земляного полотна может иметь  $R=10-30$ . При увеличении содержания битума в смеси величина  $R$  убывает, но иногда эта зависимость может иметь максимум. Можно испытывать как формованные образцы, так и керны, отобранные из покрытия. При этом вводится поправка, учитывающая отличие высоты цилиндрического образца от 64 мм.

Оптимальное содержание битума выбирают так, чтобы оно было наибольшим, при котором пористость асфальтобетона превышает 3%, удовлетворяются требования к  $R$  и уплотненный образец не имеет блеска, свидетельствующего об избытке вяжущего. Если одно из этих требований не удовлетворяется, изменяют зерновой состав минерального материала и проводят все испытания заново.

Выше упоминалось, что на стабилометре показатель  $R$  определяют не только для асфальтобетона, но и для других дорожно-строительных материалов (кроме цементобетона) и для грунтов. Причина состоит в том, что на этом показателе основан принятый по настоящее время в Калифорнии метод расчета нежесткой дорожной одежды на прочность. Зная  $R$  для грунта, находят эквивалентную толщину дорожной одежды, требуемую при заданной расчетной интенсивности движения. Выбрав материал дополнительного основания и определив величину  $R$  для этого материала, находят эквивалентную толщину слоев, расположенных поверх него. Так поступают со всеми последующими слоями.

Образец с оптимальным содержанием битума подвергали еще двум контрольным испытаниям: на набухание в воде и на когезию (связность материала). Когезиометром Хвима в 1930-40 годах определяли прочность асфальтобетонной смеси на растяжение, чтобы убедиться в устойчивости материала покрытия к шелушению и выкрашиванию. Для этого цилиндрический образец того же размера, что и при испытании на стабилометре, и при той же температуре 60°С укладывали горизонтально и посредством рычага прикладывали нагрузку, возрастающую с постоянной скоростью (насыпали свинцовую или стальную дробь в сосуд, подвешенный к рычагу). Вертикальную нагрузку, приводившую к разрушению образца, пересчитывали в сопротивление растяжению. Оказалось, однако, что практически все образцы смесей, прошедшие предыдущие испытания, имели требуемый показатель когезии. Поэтому в 1950-х годах от использования когезиометра отказались, но изобретение этого метода испытания не прошло бесследно - его модификация привела к современному методу испытания асфальтобетона на растяжение при расколе путем сжатия цилиндра по диаметрально противоположным образующим.

В окончательном виде метод Ф.Хвима был подготовлен в 1959 году и стандартизирован Американской ассоциацией испытаний и материалов ASTM (D 1560, D 1561). В нескольких штатах он был слегка видоизменен. По настоящее время Caltrans (Калифорнийский департамент транспорта) успешно использует метод Хвима для проектирования состава асфальтобетонных смесей.

Метод Хвима привнес в науку об асфальтобетоне много новых идей. Его способ уплотнения смесей достаточно хорошо воспроизводит процесс уплотнения в натуре, а показатель устойчивости имеет довольно основательное физическое обоснование.

Недостатком является высокая стоимость и громоздкость применяемого оборудования, которое можно использовать только в условиях стационарной лаборатории.

## Метод Маршалла

2.2. В 1940-1950 годах Б.Маршаллом был предложен другой метод, детально разработанный корпусом военных инженеров. В нем предусмотрено гораздо менее дорогое лабораторное оборудование для приготовления и испытания образцов смеси (портативные приборы), чем в методе Хвима (стационарное оборудование). Военные инженеры ценили предложенный Хвимом метод оценки требуемого содержания битума, но считали, что стабилометр измеряет, главным образом, внутреннее трение в смеси, а приборы Ф.Хвима пригодны для стационарной лаборатории, но не для полевых условий. В отличие от метода Ф.Хвима, большое внимание было уделено требуемому зерновому составу смеси. В частности, была выявлена связь высокого содержания природного песка с быстрым образованием колеи. Основные этапы проектирования смеси по этому методу.

### 2.2.1. Оценивают приемлемость каменных материалов.

Определяют истираемость щебня в лос-анджелесском барабане, шлифуемость, содержание глинистых частиц, содержание пластинчатых и игольчатых зерен, водостойкость, процент граней, образовавшихся при дроблении. Если материалы признаны приемлемыми, определяют зерновой состав, истинную плотность и адсорбцию битума, выраженную в процентах от массы каменного материала. Составляют смесь минеральных материалов, руководствуясь кривой плотных смесей и контрольными точками, задающими допустимый процент материала, прошедшего сита с отверстиями диаметром 2,36 и 0,075 мм. Готовят подобранный образец каменного материала для последующего смешения с битумом.

### 2.2.2. Оценивают свойства вяжущего.

- выбирают марку битума в зависимости от географической зоны района строительства и назначения покрытия (стоянка, перегон, взлетно-посадочная полоса, рулежная дорожка и т.п.);

- определяют плотность битума, измеряют его вязкость при разных температурах, строят график вязкость-температура (он близок к линейному в координатах  $\lg \lg \eta - \lg T$ , поэтому удается ограничиться измерениями при двух температурах и третьей - контрольной);

- устанавливают температуру смешения как температуру, при которой вязкость битума составляет  $170 \pm 20$  сантистоксов ( $0,17 \pm 0,02$  Па·сек), и температуру уплотнения смеси как температуру, при которой вязкость битума составляет  $280 \pm 30$  сантистоксов ( $0,28 \pm 0,03$  Па·сек).

Пример приведен на рис.5.

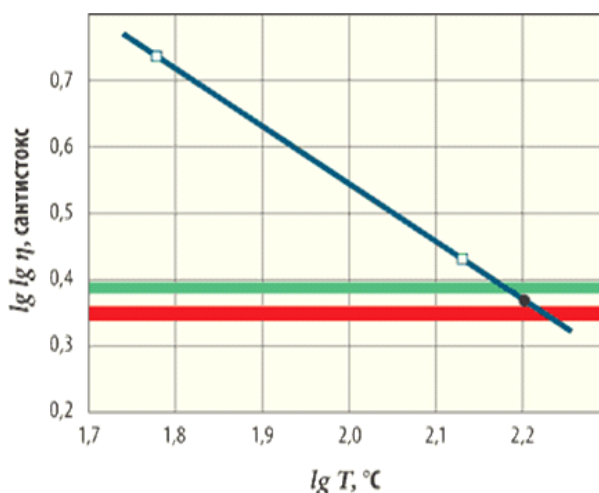


Рис.5. Определение температур смешения и уплотнения образцов в зависимости от вязкости битума

С помощью капиллярного вискозиметра определены следующие значения кинематической вязкости (в сантистоксах - сокращенно стс) при температурах 60, 135 и 159 °С:  $2,8 \times 10^5$  стс, 498 стс и 219 стс. Значениям, полученным при 60 и 135 °С, соответствует уравнение прямой  $\lg \lg \eta = A - VTS \lg T$ , где  $\eta$  - кинематическая вязкость битума, стс,  $T$  - температура (°С),  $A=2,28$  - параметр,  $VTS=0,868$  - коэффициент чувствительности вязкости к изменению температуры (viscosity - temperature susceptibility). Точка, соответствующая контрольному измерению вязкости при 159 °С, практически лежит на этой же прямой. Красным цветом показан диапазон рекомендуемой вязкости битума при перемешивании, а зеленым - при уплотнении. Пользуясь данным уравнением или его графиком, находят для приготовления образцов смеси температуру перемешивания 163-173 °С, при которой вязкость  $\eta = 150-190$  стс, и температуру уплотнения 148-155 °С, при которой  $\eta = 250-310$  стс.

### 2.2.3. Подготавливают образцы для испытаний.

Стандартные размеры образца: диаметр - 102 мм, высота - 64 мм. Считается, что диаметр образца должен превышать максимальный диаметр зерен минимум в 4 раза. В связи с этим такие образцы изготавливают для смесей с зернами не крупнее 25 мм. Для крупнозернистых смесей с максимальным размером зерен 37,5 мм принят диаметр 152 мм и высота 114 мм, а соответствующие процедуры их приготовления и испытания нормированы в 2001 году в США.

Приготавливают 15-18 уплотненных образцов, при пяти - шести различных содержаниях в них битума, изменяющихся с шагом 0,5%. Среднее значение принимают на основе опыта или базирующихся на нем рекомендаций. Кроме того, готовят 3 образца смеси в рыхлом состоянии, которые затем используют для определения плотности двухфазной системы - каменный материал + битум (асфальтобетон без воздушных пор). Этот показатель в России называют истинной плотностью асфальтобетона, а в США - теоретически максимальной плотностью асфальтобетона, а чаще - плотностью по Дж. Райсу (Rice specific gravity), предложившему в 1953 году методику его определения.

Большое внимание уделяется приготовлению смеси при соответствующей температуре, ее выдерживанию, чтобы дать время для адсорбции части битума каменным материалом, и доведению смеси до температуры уплотнения без повторного ее разогрева. Образец уплотняют на механическом компакторе ударами стального цилиндрического груза с плоской подошвой диаметром 98 мм и массой 4,54 кг, свободно падающего с высоты 457 мм. В зависимости от положения слоя и категории движения, число ударов принимается 35, 50 или 75. Указанные значения параметров относятся к образцам диаметром 102 мм.

### 2.2.4. Определяют объемные показатели асфальтобетона.

На рыхлых образцах определяют истинную плотность асфальтобетона, а на уплотненных - среднюю плотность. Вычисляют для каждого образца воздушную пористость (VTM - voids in total mix), пористость минерального остова (VMA - voids in mineral aggregates) и процент объема межзерновых пор, заполненным битумом (VFA - voids filled with asphalt).

### 2.2.5. Испытывают образцы на приборе Маршалла.

Образец, имеющий температуру 60 °С, помещают между зажимами, имеющими радиус кривизны, равный радиусу основания цилиндрического образца (рис.6), и нагружают со скоростью деформирования 50 мм/мин до момента, когда нагрузка, достигнув максимума, начнет убывать. Максимальное значение нагрузки называют устойчивостью по Маршаллу. Одновременно измеряют вертикальное перемещение верхнего зажима относительно нижнего до момента, когда нагрузка достигает максимума. Его называют текучестью по Маршаллу, или показателем пластичности, и выражают в сотых долях дюйма. Если высота образца отличается от стандартной, полученные значения показателей корректируют. В некоторых штатах используют в качестве дополнительного показатель жесткости, равный отношению устойчивости к текучести, полагая, что чем выше жесткость при летней температуре, тем выше сопротивление образованию колеи. Испытание на устойчивость и текучесть должно занимать не более 60 сек от момента извлечения образца из водяной бани, где он хранился при 60 °С, до достижения максимальной нагрузки, чтобы его температура не снизилась.



Рис.6. Прибор Маршалла

#### 2.2.6. Анализируют результаты испытаний.

Строят 6 графиков, показанных на рис.7, и проверяют правильность полученных данных, руководствуясь такими соображениями:

- плотность смеси обычно имеет максимум при некотором содержании битума (рис.7А), причем соответствующее этому количество битума, как правило (но не всегда), больше, чем то его содержание, при котором максимальна устойчивость по Маршаллу (рис.7Б);

- устойчивость по Маршаллу (рис.7Б) имеет максимум при некотором содержании битума, но иногда эта кривая получается пологой, то есть имеет слабый максимум;

- текучесть по Маршаллу возрастает с увеличением содержания битума в смеси (рис.7В); доля межзерновых пор, заполненных битумом, всегда увеличивается с увеличением содержания битума в смеси (рис.7Г);

- пористость минерального остова должна иметь минимум при некотором содержании битума (рис.7Е), аналогичном оптимальной влажности грунта, но иногда этот минимум выражен слабо.





А – средняя плотность асфальтобетона;



Г – пористость асфальтобетона



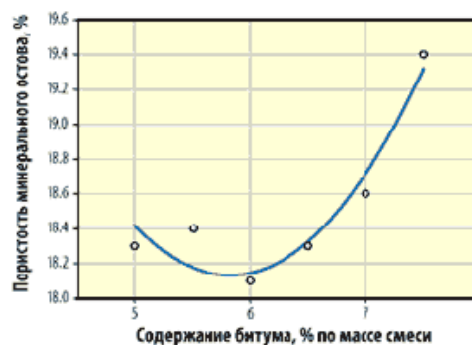
Б) Показатель устойчивости при 60°C;



Д) Доля межзерновых пор, заполненных битумом;



В) Показатель пластичности при 60°C;



Е) Пористость минерального остова асфальтобетона;

Рис.7. Пример данных, полученных при изготовлении и испытании асфальтобетонных образцов по методу Маршалла

### 2.2.7. Находят оптимальное содержание битума.

Прежде всего рассматривают данные об устойчивости и текучести. В данном случае, для тяжелого движения требуется обеспечить устойчивость не менее 8006 Н и текучесть от 8 до 14. Эти требования удовлетворяются при содержании битума в пределах от 5 до 7% (рис.7Б и 7В), причем по устойчивости - с большим запасом. Таким образом, первоначальный диапазон поиска оптимума содержания битума сузился с 5-7,5% до 5-7%. Далее, стандартными требованиями обычно являются заполнение меж зерновых пор на 70-80% и воздушная пористость 3-5%. Указанному проценту заполнения пор в данном примере отвечает количество битума в пределах 6,2-7% (рис.7Д). Таким образом, диапазон поиска оптимума содержания битума сузился с 5-7% до 6,2-7%. Учитывая, что среднему значению нормативного диапазона воздушной пористости, равному 4%, соответствует 6,9% битума (рис.7Г), можно считать оптимальным содержанием битума именно 6,9%.

2.2.8. К преимуществам метода Маршалла следует отнести портативность применяемого оборудования и внимание, уделяемое показателям объемного содержания компонентов смеси - воздушной пористости, пористости минерального остова. Объемное проектирование состава смеси, когда содержание всех ее компонентов выражают в долях занимаемого ими объема в уплотненной смеси, стало важным компонентом процесса проектирования состава по методу Суперпейв.

## О разработке метода Суперпейв

2.3. В 1980-1990 годах самыми популярными в США были метод Маршалла, использовавшийся в 38 штатах, и метод Хвима, применявшийся (иногда с некоторыми видоизменениями) в 10 штатах. Федеральное агентство авиации применяет для проектирования состава смесей для аэропортов исключительно метод Маршалла. Этот метод является самым распространенным в других странах.

За прошедшие годы выяснились многие недостатки методов Хвима и Маршалла. Сконцентрировав усилия на предотвращении колеи, Ф.Хвим, Б.Маршалл и их сотрудники оставили совершенно вне рассмотрения такие распространенные виды разрушения покрытий, как появление пересекающихся усталостных трещин и низкотемпературных трещин при быстром охлаждении, а также "отраженных" трещин основания, скопированных на асфальтобетонном покрытии. Практически не охватывают эти методы вопроса об устойчивости смеси к воздействию воды и мороза. Это можно понять: методы разрабатывались в 1930-1950 годах, когда интенсивность движения была в десятки раз меньше, чем в настоящее время, и вопрос об усталости покрытия не стоял так остро, как сегодня. Никаких механических испытаний асфальтобетона при температуре, близкой к среднегодовой, когда на дорогу воздействует основная часть транспортного потока, описанные методы не предусматривают.

Но даже обстоятельно рассмотренный Ф.Хвимом и Б.Маршаллом вопрос о предотвращении колеи в жаркое время года был, по сегодняшним меркам, решен неудовлетворительно.

### Вот несколько примеров:

1. Как уже отмечалось, усилия специалистов из инженерного корпуса были направлены на разработку дешевого и портативного способа уплотнения, который бы воспроизводил плотность смеси, полученную при строительстве и последующем доуплотнении движением. Однако непонятно, какому именно моменту службы отвечает нормируемая пористость 3-5% - вводу в эксплуатацию или середине срока службы.

2. Исследования показали, что структура смеси, уплотненной в покрытии, существенно отличается от таковой, получаемой в лаборатории, даже при одинаковых плотностях асфальтобетона. Многие инженеры сомневаются, что ударное уплотнение грузом с плоской подошвой правильно воспроизводит процесс уплотнения смеси в полевых условиях. Поэтому серьезные специалисты предпочитают уплотнять смесь в покрытии и отбирать из него образцы для испытаний.

3. В методах Хвима и Маршалла испытания образцов проводят только при одной температуре 60°C. Хотя такая температура покрытия типична для летнего периода, в США имеются штаты с наибольшей летней температурой покрытия 58°C, и есть штаты, где она достигает 70°C. Температурные условия испытаний не дифференцированы для разных длительностей жаркого периода.

4. Показатель устойчивости по Маршаллу легче всего повысить, взяв битум большей вязкости. Можно добиться его повышения и за счет применения более угловатых частиц щебня, то есть увеличением доли дробленого каменного материала, что логично. Но можно пойти по другому пути - ввести небольшое количество мелких частиц пылеватой фракции, тогда устойчивость увеличится. Однако оказывается, что если эти частицы очень мелкие, то их добавление приводит к уменьшению устойчивости по Маршаллу. В комплексе анализировать влияние таких изменений в составе смеси на показатели устойчивости и пластичности весьма сложно.

5. При измерении показателя устойчивости по Маршаллу получается большой разброс. Фактически, технические условия ASTM D 1559 не содержат никаких указаний по требуемой точности определения этого показателя (что очень необычно для стандартов ASTM), хотя попытки собрать данные о разбросе в разных лабораториях неоднократно делались на протяжении многих лет. Получается, что показатель, изменяющийся при влиянии состава смеси, имеет большой разброс. Ясно, что продуктивно работать с таким показателем могут только опытные специалисты.

6. Нормативные значения устойчивости по Маршаллу трудно дифференцировать в зависимости от интенсивности движения. Представим себе, что надо подобрать смесь для покрытия при суммарном числе проездов расчетной нагрузки 20000. Тогда, требуется обеспечить показатель

устойчивости 5338 Н. Но представим себе отношение инженера к этому требованию: такой же показатель устойчивости требуется для 900000 проездов! Хотелось бы приблизиться к показателю 3336 Н, нормированному для интенсивности менее 10000, но интерполировать не разрешается, что можно понять в связи со значительным разбросом результатов измерений устойчивости.

7. Как показал накопленный опыт, применение битума, модифицированного полимером, способствует повышению устойчивости к образованию колеи. Однако при использовании методов Хвима и Маршалла положительный эффект от введения полимера просматривается далеко не однозначно. Например, в одном из проектов при модификации битума добавкой 1,5% полимера Elvaloy получалось, что оптимальное содержание вяжущего увеличилось на 0,4%, показатели стабильности и текучести слегка возросли, но так, что их отношение (жесткость) уменьшилось. В итоге, если ориентироваться только на результаты испытаний по Маршаллу, то применение полимерной добавки в данном случае нецелесообразно, что противоречит полевым испытаниям. Подобных примеров можно привести много.

8. Повышение или понижение показателя устойчивости асфальтобетона никак не сказывалось на проектной толщине асфальтобетонного покрытия или расположенного под ним основания, поскольку полученные механические характеристики не были связаны с расчетом дорожной одежды на прочность. Между тем, инженерный здравый смысл подсказывает, что глубина колеи непосредственно связана с толщиной асфальтобетонного покрытия. Кроме того, при не очень толстом покрытии колея в значительной степени обусловлена деформациями щебеночного основания, поведение которого зависит от жесткости покрытия, а при тонком покрытии - и накоплением остаточных деформаций переувлажненного грунта. Методы же Хвима и Маршалла рассматривают накопление остаточных деформаций как следствие только свойств асфальтобетона, без учета даже толщины слоя из этого материала.

В конце 1980-х стало ясно, что взамен чисто эмпирических методов Хвима и Маршалла необходимо разработать новый метод проектирования состава асфальтобетонной смеси на более фундаментальной научной основе. С этой целью с 1988 по 1993 год Федеральное правительство США профинансировало работы Стратегической дорожной исследовательской программы (Strategic Highway Research Program - SHRP), в которых приняли участие сотни исследователей из разных стран. Полученные результаты содержат три основных элемента:

- новую систему классификации вяжущих;
- требования к каменным материалам;
- метод проектирования состава асфальтобетонной смеси.

Для удобства эта система названа сокращенно Суперпейв (Superior Performing Asphalt Pavement System - Superpave). Система Суперпейв в настоящее время дорабатывается в сочетании с новым методом расчета дорожных одежд и одновременно внедряется в подавляющем большинстве штатов.

### **III. Принципы системы Суперпейв**

#### **3.1. Можно выделить три составных части системы:**

- критерии выбора и методы испытания битумного вяжущего;
- критерии выбора и методы испытания каменного материала;
- объемное проектирование смеси и прогноз её поведения.

#### **3.2. Требования к вяжущим материалам**

##### **3.2.1. Расчетные температуры.**

Система "Суперпейв" непосредственно ориентирована на температурные и транспортные

условия работы покрытия. Маркировка вяжущего ведется по эксплуатационным (фактическим - температурным) условиям (PG - Performance Graded).

Например, вяжущее марки PG 64-28 предназначено для района со средней за семь последних наиболее жарких дней с температурой покрытия 64°C и наименьшей за расчетный период зимней температурой покрытия - минус 28°C. Установить требуемую марку вяжущего может заказчик или проектировщик. Для этого используется база данных ближайшей метеостанции о ежедневных температурах воздуха не менее чем за 20 лет наблюдений. На основе данных о температурах воздуха находят расчетные температуры покрытия. Расчетные температуры покрытия определяются по формулам, рекомендуемым Асфальтовым институтом (США):

Расчетная летняя температура в покрытии на глубине 2,0 см от поверхности выражается формулой

$$T_{20\text{летн}} = 0,9545(T_{\text{летн}} - 0,006181L_{\text{с.ш.}}^2 + 0,2289L_{\text{с.ш.}} + 42,2) - 17,78 = +^{\circ}\text{C},$$

где  $T_{\text{летн}}$  - летняя температура воздуха в тени

$L_{\text{с.ш.}}$  - северная широта местности

Расчетная зимняя температура в покрытии на глубине 2,0 см от поверхности выражается формулой

$$T_{20\text{зим}} = 0,856T_{\text{зим}} + 1,7 = -^{\circ}\text{C},$$

где  $T_{\text{зим}}$  - зимняя температура воздуха.

### 3.2.2. Марки вяжущих

Вяжущие маркируются с шагом 6°C как показано в таблице 1.

#### Марки вяжущих по условиям эксплуатации

Таблица 1

Марка по высокой температуре, °C	Марка по низкой температуре, °C						
	-34	-40	46				
PG46							
PG52	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46
PG58	-16	-22	-28	-34	-40		
PG64	-10	-16	-22	-28	-34	-40	
PG70	-10	-16	-22	-28	-34	-40	
PG76	-10	-16	-22	-28	-34		
PG82	-10	-16	-22	-28	-34		

Зачем же эти температуры используются для маркировки вяжущего?

Дело в том, что марка вяжущего PG 58-28 свидетельствует о его применимости при расчетной летней температуре покрытия 58°C и при расчетной зимней температуре равной минус 28°C в условиях скоростного движения (больше 70 км/ч) средней интенсивности (до 10 млн. проездов осей с расчетной нагрузкой 80 кН за срок службы). Но для участков с медленным движением (например, для рулежных дорожек аэродромов или для перекрестков), на которых средняя скорость заключена в пределах 20-70 км/ч либо для участков, где приведенное к расчетной нагрузке число проездов за срок службы по одной полосе проезжей части превышает 10 млн. осей, рекомендуется выбирать вяжущее на одну марку (на 6°C) "жарче".

Для участков с очень медленным движением, на которых средняя скорость не превышает 20

км/ч, выбирают вяжущее на две марки "жарче", т.е. также PG 70-28. Поэтому для местности с реальной расчетной летней температурой покрытия 70°C может потребоваться "сдвиг" марки максимум на 12°C, что и учтено в таблице введением марки PG 82.

Таким образом, в системе Суперпейв вяжущие действительно маркируют исходя из главных эксплуатационных условий работы покрытия: его температуры зимой и летом, проектной интенсивности движения и скорости транспортного потока.

### 3.2.3. Технические требования к вяжущему.

Чтобы покрытие могло противостоять трем главным типам разрушения (образованию колеи летом, появлению усталостных трещин под действием повторных нагрузок и образованию поперечных трещин при охлаждении), к вяжущему предъявляют требования, которым оно должно удовлетворять при расчетных эксплуатационных температурах данного района и которые соответствуют марке вяжущего.

Нормы Суперпейва предъявляют одни и те же требования к обычному битуму и к полимерно-битумному вяжущему. Эти требования стремились разработать так, чтобы они не зависели от того, как модифицирован битум. Раньше для каждого вида вяжущего - для битума, полимерно-битумного вяжущего и дегтя - разрабатывали отдельные стандарты. В каждом из этих вяжущих выделяли несколько марок, например по глубине проникания иглы, и указывали требования для данной марки в отношении других показателей: к температуре размягчения, растяжимости и т.д. Если будут когда-нибудь предложены другие виды или способы модификации, то для каждого из них придется разрабатывать новый стандарт, а потом разрабатывать рекомендации о том, в каких условиях целесообразно применять различные марки этого вяжущего.

Подход Суперпейва совершенно другой: требования к вяжущему должны предъявляться в зависимости от условий эксплуатации (температура, нагрузка, интенсивность движения, скорость движения) так, чтобы покрытие противостояло трем указанным типам разрушения, а какое для этого потребуется вяжущее - вопрос технико-экономический, который является вторичным по отношению к эксплуатационным требованиям.

Другая особенность системы Суперпейв состоит в том, что она ориентирована на фундаментальные, а не на эмпирические, физико-механические характеристики вяжущего. В традиционных стандартах многие показатели свойств вяжущего (глубина проникания иглы, температура размягчения, растяжимость и другие) были эмпирическими величинами. Они могли быть успешно использованы только для определенного вяжущего в определенных условиях. Например, глубина проникания иглы в битум зависит от диаметра иглы, формы ее наконечника; температура размягчения по методу "кольцо и шар" зависит от диаметра кольца, на которое нанесена пленка битума, и от диаметра и массы шара. Фундаментальные же характеристики не должны зависеть от размеров или от конструкции прибора, на котором их определяют. Такими характеристиками являются, например, модуль сдвига, функция релаксации, плотность (масса единицы объема), "абсолютная" (динамическая) вязкость при нулевой скорости деформации и другие.

Для оценки сопротивляемости вяжущего накоплению остаточных деформаций и его сопротивления усталости в Суперпейве используется один и тот же показатель - комплексный модуль сдвига  $S$ , но применительно к сопротивлению асфальтобетона образованию колеи его определяют при расчетной летней температуре (например, 58°C), а для оценки сопротивления асфальтобетона усталости при многократном изгибе - величину  $S$  определяют по результатам испытания вяжущего при температуре, близкой к среднегодовой. Эта температура указана для каждой PG-марки вяжущего.

В сопромате и теории упругости используют модуль продольной упругости  $E$  и модуль сдвига  $G$ . Модуль  $E$  связывает нормальное напряжение  $\sigma$  и нормальную деформацию упругого материала  $\varepsilon$  согласно закону Гука  $\sigma = E\varepsilon$ . Модуль сдвига  $G$  связывает касательное напряжение  $t$  и сдвиговую (угловую) деформацию  $y$ :  $t = Gy$ . Он может быть выражен через  $E$  соотношением  $G = E/[2(1+\nu)]$ , в котором  $\nu$  - коэффициент поперечной деформации. В частности, при  $\nu = 0,5$  модуль сдвига  $G = E/3$ . Битум же является вязко-упругим материалом. В таких материалах напряжение и деформация изменяются во времени. При гармоническом (например, синусоидальном) нагружении связь между напряжением и деформацией характеризуют комплексным модулем  $G' = T(t)/y(t)$ , который получается зависящим от времени  $t$ , причем деформация отстает от напряжения на фазовый угол  $S$ . С учетом этого комплексный модуль выражают как сумму

$$G^* = G' + iG''$$

где  $G'$  - модуль упругости при сдвиге,

$G''$  - модуль потерь,

причем для измерения  $G^*$  в Суперпейве используют динамический сдвиговый реометр (DSR), на котором при гармоническом нагружении с частотой 10 радиан/сек испытывают образец вяжущего (см. рис.8) толщиной 1 или 2 мм и измеряют отношение максимальных амплитуд напряжения и деформации, равное  $|G'|$ , а также фазовый угол  $\delta$ , где  $|G^*|$  - абсолютная величина комплексного модуля

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

При круговой частоте 10 радиан/сек время увеличения напряжения составляет около 0,16 сек. По порядку величины это соответствует длительности действия нагрузки 0,1 сек, характерной для напряженного состояния покрытия при проезде автомобиля.



Рис.8. Образец вяжущего толщиной 1 мм и диаметром 25 мм для испытания на сдвиг при циклическом кручении с помощью динамического сдвигового реометра (DSR)

Требование Суперпейва к вяжущему исходя из устойчивости асфальтобетона к образованию колеи таково: для любой марки вяжущего при расчетной летней температуре минимальное допустимое значение отношения

$$|G^*|/\sin \delta = 1 \text{ кПа}$$

(а после искусственного "тонкопленочного" старения вяжущего в специальной печи RTFO, имитирующей старение при приготовлении смеси и ее укладке, - 2,2 кПа).

Современное требование Суперпейва к вяжущему исходя из сопротивления асфальтобетона усталости таково: для любой марки вяжущего при среднегодовой температуре максимальное допустимое значение произведения  $|G^*|/\sin \delta = 5 \text{ кПа}$ , причем перед испытанием вяжущее сначала подвергают искусственному "тонкопленочному" старению в печи RTFO, а затем выдерживанию в камере высоких температуры и давления (PAV) для имитации процесса длительного окислительного старения в условиях многолетней эксплуатации покрытия.

Требование Суперпейва к вяжущему, исходя из уменьшения опасности образования низкотемпературных трещин в асфальтобетоне, легко понять: вяжущее не должно быть очень жестким при расчетной зимней температуре - оно должно сохранять способность деформироваться.

Перед испытанием вяжущее подвергают искусственному старению, соответствующему приготовлению смеси и службе асфальтобетона в покрытии в течение примерно половины предполагаемого межремонтного периода. Жесткость вяжущего характеризуют величиной модуля

жесткости (stiffness), равного отношению постоянного напряжения к деформации за определенный промежуток времени

$$S = \sigma/\varepsilon(t).$$

Жесткость подобна модулю упругости, но в знаменателе деформация включает как упругую, так и остаточную составляющую. Жесткость вяжущего при расчетной низкой температуре определяют с помощью реометра с изгибающейся балкой (BBR).

К образцу вяжущего в виде балки (см. рис.9) на двух опорах посередине пролета прикладывают постоянную вертикальную нагрузку и 4 минуты регистрируют изменение прогиба во времени - строят кривую ползучести. Приняв  $t=60$  сек, рассчитывают жесткость  $S$  и скорость ползучести  $m$  в координатах  $\lg(S)-\lg(t)$ , т.е.  $m=d \lg(S)/d \lg(t)$ . По Суперпейву требуется, чтобы модуль жесткости вяжущего зимой был не больше 300 МПа и при этом скорость деформации вяжущего должна быть не менее  $m=0,3$ .



Рис.9. Образец вяжущего в виде балки с размерами 125x12,5x6,25 мм для испытания на изгиб при низкой температуре

Если, однако, хотя бы одно из требований к  $S$  и  $m$  не выполняется, имеется дополнительное испытание, результат которого "перевешивает" неудачу: это испытание образца вяжущего на чистое растяжение на приборе DDT (direct tension test). Требования к вяжущему при низкой температуре считаются выполненными, если измеренное относительное удлинение образца в момент разрушения (при скорости деформирования 3%/мин) равно не менее 1%. Такое вяжущее считают достаточно пластичным при зимней расчетной температуре. В США считают, что способность асфальтобетона противостоять появлению температурных трещин в наибольшей мере зависит от свойств вяжущего, а его содержание в смеси, свойства каменного материала и др. играют второстепенную роль.

### 3.3. Требования к каменному материалу

В асфальтобетоне на каменный материал приходится 80-90% объема и 90-95% массы. При разработке Суперпейва не проводили специальных исследований каменного материала для асфальтобетонных покрытий, а на первом этапе создания нормативов обобщили накопленный опыт и на его основе сформулировали технические требования.

В Суперпейве нормируются два типа свойств каменного материала:

- согласованные свойства (consensus properties);
- свойства материнской породы (source properties).

Согласованными называют те свойства каменного материала, которые в первой фазе разработки Суперпейва группа высококвалифицированных экспертов на основании накопленного опыта признала решающими для получения асфальтобетона высокого качества.

К рассматриваемым в Суперпейве свойствам материнской породы относят те свойства каменного материала, которые обычно нормируются его местным производителем или потребителем в

зависимости от свойств исходной горной породы.

### 3.3.1. **Согласованные свойства**

Требования к этим свойствам зависят от уровня проектирования (т.е. от расчетной интенсивности движения) и от того, насколько глубоко от поверхности покрытия расположен данный слой асфальтобетона. К ним относятся:

- угловатость крупных зерен;
- угловатость мелких зерен;
- содержание зерен пластинчатой и игловатой форм;
- содержание глинистых частиц в каменном материале.

При этом крупной (coarse) принято называть ту часть каменного материала, которая полностью задерживается ситом с отверстиями 4,75 мм, а мелкой (fine) - ту, что полностью проходит через это сито и остается на сите с отверстиями 0,075 мм (ASTM D8-02 - Американское общество испытаний и материалов, D8-02: "Стандартная терминология"). Заметим, что в ряде руководств по асфальтобетону границей между крупным и мелким каменным материалом считается сито 2,36 мм, а не 4,75 мм. Каменный материал, по меньшей мере, 70% массы которого проходит через сито 0,075 мм, называют минеральным порошком (mineral filler).

Угловатость крупных зерен характеризуют процентом (по массе) частиц с одной или более отколотой гранью. Угловатость крупных зерен определяют по стандарту ASTM D5821 методом, аналогичным российскому ГОСТ 8269.0-97 (с поправками 1999) на щебень и гравий для строительных работ.

Считается, что зерна с отколотыми гранями способствуют повышению внутреннего трения, т.е. увеличивают сопротивление асфальтобетона сдвигу в жаркое время. Поэтому чем выше интенсивность движения, тем больше таких зерен должно быть в смеси (табл.2). Дробь типа 85/80 означает, что 85% крупных зерен имеют одну отколотую грань, а 80% - две и более отколотых грани.

Угловатость мелких зерен характеризуют косвенным показателем их формы - пористостью в уплотненном состоянии, поскольку сосчитать число отколотых граней у мелких зерен - невыполнимо трудоемкая работа. Почему остановились на пористости как показателе формы зерен? Дело в том, что одинаковые шарики, беспорядочно насыпанные в большой контейнер и утрамбованные в нем, обычно занимают около 64% объема, а 36% общего объема приходится на воздушные поры. Без уплотнения эти же шарики после отсыпки с небольшой высоты (в поле действия сил тяжести) занимают около 60% объема, а пористость равна примерно 40%. При разработке Суперпейва исходили из общепринятого до недавних лет представления, что пористость зернистого материала, состоящего из нешарообразных частиц одного размера, будет больше, чем для одинаковых шариков, а поэтому чем меньше пористость, тем больше в материале окатанных зерен. Поскольку желательно, чтобы мелкие зерна не были шарообразными, то чем больше пористость мелкого материала в рыхлом состоянии (например, 45% в табл.2), тем лучше. Предварительно промытый и высушенный мелкий каменный материал с помощью воронки с определенной высоты насыпают в цилиндр стандартного размера. Зная плотность материала частиц, после взвешивания цилиндра с каменным материалом вычисляют пористость.

К пластинчатым и игловатым относят крупные зерна, имеющие соотношение размеров более 5 (в России принято соотношение 3). Размеры измеряют с помощью шарнирного шаблона. Их количество выражают процентом по массе, который не должен превышать 10%. Для движения очень малой интенсивности содержание крупных зерен пластинчатой и игловатой форм не нормировано (табл.2).

### **Согласованные свойства каменного материала асфальтобетонной смеси**



Число проездов осей с расчетной нагрузкой 80 кН по одной полосе за 20 лет (в млн.)	Процент крупных зерен с околотой гранью, не менее		Пористость неуплотненного мелкого каменного материала, % не менее		Песчаный эквивалент не менее %	Содержание зерен пластинчатой и игловатой форм не более
	При глубине слоя менее 10 см	При глубине слоя более 10 см	При глубине слоя менее 10 см	При глубине слоя более 10 см		
< 0,3	55/-	-/-	-	-	40	-
0,3-3	75/	50/-	40	40	40	10
3-10	85/80	60/-	45	40	45	10
10-30	95/90	80/75	45	40	45	10
> 30	100/100	100/100	45	45	50	10

Содержание частиц глинистой фракции в каменном материале мельче 4,75 мм оценивают с помощью так называемого "песчаного эквивалента" (AASHTOT176 или ASTM D2419). Песчаный эквивалент представляет собой показатель, характеризующий объемную долю зерен песчаной фракции в грунте либо в мелкой части щебеночной смеси с учетом возможного увеличения объема грунта при набухании глинистой фракции. Он определяется методом осаждения в воде с добавкой хлористого кальция, глицерина и формальдегида аналогично применяемому в России полевому методу Рутковского для оценки содержания в грунте песчаной, пылевой и глинистой фракций. После взмучивания суспензии частиц каменного материала в воде ее отстаивают в градуированном прозрачном цилиндре не дольше 20 мин. Первыми оседают более крупные зерна, и они находятся внизу. Последними оседают суспендированные глинистые частицы, которые образуют верхний слой осадка. Отношение высоты верхней границы песчаного слоя к общей высоте, выраженное в процентах, называют песчаным эквивалентом. Чем больше песчаный эквивалент, тем меньше глинистых частиц в каменном материале.

Однако этот простой полевой метод имеет ряд недостатков: расположенные вблизи дна глинистые частицы суспензии оседают внизу, среди песчаных и щебеночных зерен, а не вверху; мелкие продукты дробления каменного материала медленно оседают и оказываются в верхней части, среди частиц глинистой фракции, хотя не содержат глинистых минералов и потому не опасны для асфальтобетона. В последние годы для определения содержания глинистых частиц в США широко используют более точный метод определения содержания глинистых частиц по расходу красителя - метиленового голубого. Этот метод еще 30 лет назад применяли в "СоюзДорНИИ" и "ГосДорНИИ", и в ГОСТ 8269.0-97 на щебень и гравий для строительных работ он включен как факультативный.

### 3.3.2. Свойства горной породы.

В дополнение к "согласованным свойствам" каменных материалов эксперты пришли к заключению о важности некоторых других свойств, но им не удалось предложить нормативных значений показателей этих свойств, поскольку они зависят от исходной горной породы. К ним относятся:

- износ в лос-анджелесском барабане ("toughness");
- морозостойкость ("soundness");
- наличие вредных примесей ("deleterious materials").

**Потеря в массе при износе** во вращающемся барабане с металлическими шарами считается показателем сопротивления крупнозернистого каменного материала истиранию и механическому разрушению при перевозке, укладке и в процессе службы дороги. Типичные допустимые значения находятся в пределах 35-45%.

**Показатель морозостойкости** рассматривается как индикатор способности каменного материала противостоять физическому выветриванию и определяется как потеря в весе в

насыщенный водный раствор сульфата натрия или сернокислого магния и последующего высушивания в печи. В зависимости от горной породы потери в весе после пяти циклов нормируют обычно в пределах 10-20%.

**Вредными примесями** считаются комки глины, частицы дерева, слюды и угля. Анализируют как крупный, так и мелкий каменный материал. В зависимости от вида примеси разные агентства нормируют содержание вредных примесей в широком диапазоне от 0,2 до 10%.

### 3.3.3. Зерновой состав.

При ситовом анализе зернового состава минеральной части асфальтобетонной смеси в США используют стандартный набор из 12 сит ASTM: 37,5, 25,0, 19,0, 12,5, 9,5, 4,75, 2,36, 1,18, 0,600, 0,300, 0,150 и 0,075 мм.

Прежде всего необходимо отметить, что при разработке Суперпейва были сформулированы два простых, но необходимых определения:

**"Максимальным размером зерен называют размер отверстия стандартного сита (10 мм) на один размер больше номинального максимального размера зерен".**

**"Номинальным максимальным размером зерен называют размер отверстия сита на один размер больше того первого сита (20 мм), остаток на котором превышает 10% общей массы пробы каменного материала.**

Первое сито с остатком более 10% имеет диаметр 10 мм. Номинальный максимальный размер зерен равен диаметру предыдущего российского стандартного сита - 15 мм. Максимальный размер на один размер больше номинального - 20 мм.

### Пример зернового состава минерального материала асфальтобетонной смеси с номинальным максимальным размером зерен 19 мм

Таблица 3

Диаметр отверстия сита D, мм	Номера сит в английских обозначениях	Массовая доля P(D) частиц мельче D, %	Контрольные точки P(D), %
25	1"	100	100
19	$\frac{3}{4}$ "	99,5	90-100
12,5	$\frac{1}{2}$ "	87,3	
9,5	$\frac{3}{8}$ "	77,6	
4,75	N 4	51,6	
2,36	N 8	32,3	23-39
1,18	N 16	21,8	
0,6	N 30	15,9	
0,3	N 50	12,3	
0,15	N 100	8,6	
0,075	N 200	5,3	2-8

В Суперпейве различают 5 смесей разной крупности, обозначая их через номинальный максимальный размер: 37,5; 25,0; 19,0; 12,5 и 9,5 мм. Соответственно, максимальные размеры этих смесей: 50,0; 37,5; 25,0; 19,0 и 12,5 мм.

Для удобства стандартизации кривых зернового состава в Суперпейве использован "график в степени 0,45" (см. рис.10), по вертикальной оси которого отложен, как обычно, процент массы пробы, прошедший через сито с отверстием данного размера, а по горизонтальной оси - вместо обычного логарифма диаметра отверстия сита отложен диаметр, возведенный в степень 0,45.

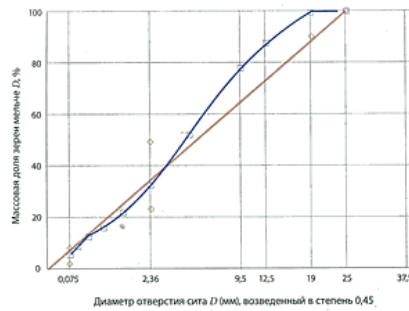


Рис.10. Пример зернового состава смеси с номинальной крупностью 19 мм

Красным цветом показана "прямая максимальной плотности"  
 Синим цветом показан зерновой состав подобранной смеси фракций каменного материала  
 Ромбами обозначены контрольные точки

Это связано с тем, что ровно 100 лет назад Fuller и Thompson, занимаясь подбором состава цементного бетона, получили экспериментально, что для зернистого материала, в котором имеются частицы всех размеров мельче крупнейшего зерна (т. е. не пропущена ни одна фракция), можно найти такое распределение по размерам, при котором получается упаковка наибольшей плотности. Через несколько лет Talbot и Richart предложили описывать зерновой состав уравнением

$$P(D)=100(D/D_{\max})^k$$

в котором  $D$  - диаметр отверстия сита,

$D_{\max}$  - наибольший диаметр зерна данного зернистого материала,

$P(D)$  - масса зерен мельче данного размера  $D$  ("проходы" сквозь сито с отверстием диаметра  $D$ ), выраженная в процентах от общей массы пробы

Они показали, что данные Фуллера и Томпсона о наиболее плотной смеси зерен описываются этим уравнением при показателе степени  $k=0,50$ . Выяснилось, однако, что наличие цемента и воды тоже влияет на плотность упаковки. Кроме того, бетонные смеси получались неудобно укладываемыми.

В 1940-х Nijboer, экспериментируя с асфальтобетонными смесями, составленными так, что показатель степени в формуле для  $P(D)$  имел значения  $k=0,31, 0,38, 0,45, 0,52, 0,59$  и  $0,66$ , пришел к выводу, что пористость минеральной части асфальтобетона минимальна при  $k=0,45$ . Продолжив его исследования авторы работы предложили строить графики зерновых составов, откладывая по горизонтальной оси  $D^{0,45}$ , тогда кривая "наиболее плотного" зернового состава будет выглядеть на этом графике прямой, соединяющей начало координат с точкой, соответствующей максимальному размеру зерен (см. рис.10). Следует отметить два обстоятельства:

1) результаты работ относятся только к степенному уравнению типа, но другие кривые могут давать более высокую плотность;

2) как показали опыты, асфальтобетон с зерновым составом каменного материала, соответствующим формуле при  $k=0,45$ , имеет столь малую пористость минеральной части, что места для битума остается слишком мало, битумная пленка получается чересчур тонкой, что чревато быстрым старением вяжущего. Поэтому "прямая наиболее плотного состава" приводится просто для ориентировки и настоятельно рекомендуется подбирать состав так, чтобы описывающая его кривая располагалась либо выше, либо ниже нее.

Для кривых стандартной крупности с номинальным максимальным размером 37,5; 25,0; 19,0; 12,5 или 9,5 мм в Суперпейве даются контрольные точки, в пределах которых должны находиться кривые (табл.3 и рис.10). На первом этапе нормы содержали также зону, располагавшуюся между 0,30 и 2,36 мм, которую кривая зернового состава не должна была пересекать. Это было связано с опасениями

относительно уплотняемости смесей, содержащих окатанные пески.

Однако после детальных исследований в 2002 году вышел циркуляр, отменивший ограничительную зону.

### 3.4. Подбор и объемное проектирование состава смеси

#### 3.4.1. Прибор для уплотнения образцов смеси.

Заключительным этапом проектирования состава асфальтобетонной смеси является определение содержания в ней битума и каменного материала так, чтобы удовлетворялись требования Суперпейва к минимальной пористости минеральной части и к воздушной пористости асфальтобетона. Кроме этих основных показателей, предъявляются требования к соотношению содержаний битума и минерального порошка, к удобоукладываемости асфальтобетона, его водостойкости и др.

Поскольку нет теории, позволяющей прогнозировать, какую часть пространства будут занимать беспорядочно расположенные частицы зернистого материала после его уплотнения (тем более нет такой теории для его смеси с вяжущим), приходится в лаборатории уплотнять образец смеси в условиях, как можно ближе воспроизводящих плотность, получаемую в покрытии. Поэтому ключевым прибором в Суперпейве является прибор жираторного (вращательного) уплотнения.

Прибор жираторного уплотнения (см. рис.11) используют для приготовления образцов смеси диаметром 150 мм и высотой около 115 мм. Первый прибор такого типа был сконструирован в конце 1930-х годов в дорожном департаменте штата Техас, затем дорабатывался в 1950-х в корпусе военных инженеров США, был запатентован в США в 1957 году, а в 1970-х усовершенствован в Центральной Лаборатории Мостов и Дорог Франции. Этот усовершенствованный вариант прибора был принят в качестве базового при разработке Суперпейва.

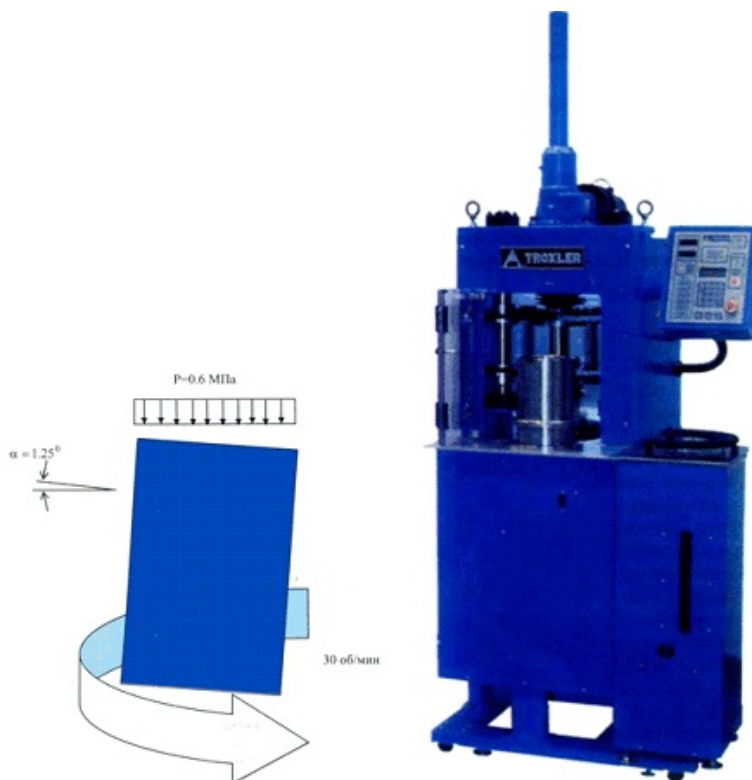


Рис.11. Принципиальная схема и общий вид прибора жираторного уплотнения фирмы Troxler

Смесь, находящуюся в стальном цилиндре, уплотняют вращением относительно вертикальной оси, причем задают постоянный угол наклона ( $1,25^\circ$ ) подошвы этого цилиндра к дискообразной стальной пластинке, передающей на торец образца постоянное вертикальное внешнее давление,

примерно равное давлению колеса автомобиля на покрытие (0,6 МПа).

Уплотняемая смесь подвергается при этом сдвиговым деформациям в вертикальной плоскости. Степень уплотнения контролируют в первом приближении на основе измерения высоты образца (его диаметр остается постоянным - 150 мм), а затем уточняют гидростатическим взвешиванием.

Прежде всего отметим, что в США принято характеризовать плотность строительных материалов и грунтов безразмерной величиной  $G$  (specific gravity), равной отношению плотности данного материала к плотности воды, которая, как известно, равна 1 г/см<sup>3</sup>. Так, если каменный материал из гранитного щебня имеет плотность 2,65 г/см<sup>3</sup>, то записывают  $G_{sb} = 2,65$  (индекс  $sb$  означает "stone bulk", т.е. вес гранитного зерна, деленный на его объем, включая объем мик-ропор, имеющихся в камне). Соответственно, плотность битумного вяжущего близка к  $G_b = 1$  (индекс  $b$  означает "binder" - вяжущее). Эта безразмерная форма выражения плотности удобна, в частности, в США, чтобы избежать путаницы с метрическими и английскими единицами измерения. Используемые в современной дорожной литературе обозначения часто имеют два индекса. Первый из них означает объект, к которому обозначение относится:  $b$  - binder (вяжущее),  $s$  - stone (камень - каменный материал),  $m$  - mix (смесь), а второй характеризует характер показателя:  $b$  - bulk ("взятый гуртом", объемный),  $e$  - effective (эффективный),  $a$  - apparent (кажущийся),  $m$  - maximum (максимальный).

В качестве показателя степени уплотнения асфальтобетонной смеси используют отношение плотности смеси  $G_{mb}$  (индекс  $mb$  означает "mix bulk", т.е. вес смеси, деленный на ее объем, включающий имеющиеся в ней воздушные поры), к истинной плотности асфальтобетона  $G_{mm}$  (индекс  $mm$  означает "maximum specific gravity of mixture", т.е. максимальную возможную плотность смеси), называемой в США "теоретической плотностью" или плотностью по Д.Раису.

Величина  $G_{mm}$  представляет собой отношение массы неуплотненной смеси к ее объему (объему вытесненной смесью жидкости). Таким образом, "теоретическая плотность"  $G_{mm}$  - это суммарная масса каменного материала и битума, деленная на их суммарный объем, т.е. плотность двухфазной системы, не имеющей воздушных пор. Следовательно, отношение  $G_{mb}/G_{mm}$  непосредственно характеризует воздушную пористость смеси. Скажем, если это отношение равно 96%, то в уплотненной смеси содержится 4% пор по объему. Ясно, что отношение  $G_{mb}/G_{mm}$  не может превышать 1.

Формуя каждый образец смеси, для него задают 3 различных уровня степени уплотнения, задавая для этого 3 значения числа оборотов:  $N_{initial}$ ,  $N_{design}$  и  $N_{max}$ . Проектное число оборотов  $N_{design}$  является главным: оно задается так, чтобы создать ту плотность образца смеси, которая ожидается в покрытии после его многолетней службы. В США считают, что при пористости асфальтобетона выше 7-8% его водопроницаемость резко увеличивается. С другой стороны, исследования показали, что слишком плотные смеси быстро образуют колею: как только асфальтобетон под действием движения автомобилей доуплотнился до воздушной пористости 2%, его остаточные деформации летом нарастают лавинообразно. (Заметим в связи с этим, что по российскому ГОСТ 9128-97\* высокоплотная асфальтобетонная смесь должна сразу после окончания строительства иметь воздушную пористость 1-2,5%, а плотная - 2,5-5%). Поэтому в Суперпейве в качестве "целевой" принята пористость 4%. Она должна быть достигнута за проектное число  $N_{design}$  оборотов. Число  $N_{design}$  назначают в зависимости от проектной приведенной интенсивности движения по дороге (табл.4).

\* Взамен действует ГОСТ 9128-2009. - Примечание изготовителя базы данных.

### Параметры уплотнения на жираторном приборе

Таблица 4

Движение ESALs*, млн	Параметры уплотнения	Типичные условия движения
----------------------	----------------------	---------------------------

	$N_{initial}$	$N_{design}$	$N_{max}$	
< 0,3	6	50	75	Легкое движение.
0,3-3	7	75	115	Среднее движение
3-30	8	100	160	Интенсивность от средней до высокой
> 30	9	125	205	Высокая интенсивность

Другой уровень уплотнения создается после так называемого начального числа оборотов  $N_{initial}$ . Он нужен для суждения об уплотняемости смеси. Считается, что смесь не должна быть легко уплотняемой. Если она уплотняется слишком легко, то это может быть признаком низкого качества каменных материалов или в ней имеется избыток окатанного песка. Кроме того, легко уплотняемая в лаборатории смесь может оказаться слишком подвижной при укатке слоя, либо покрытие из нее будет быстро накапливать деформации. Например, для не очень высокой интенсивности движения "целевая" пористость асфальтобетона 4% должна быть достигнута через 115 оборотов жираторного прибора. Но если уже после  $N_{initial} = 7$  оборотов пористость первоначально рыхлой смеси получилась 8%, то это говорит о ее слишком легкой уплотняемости: после числа оборотов  $N_{initial}$  пористость не должна быть меньше 11%.

Наконец, на третьем уровне уплотнения  $N_{max}$  проверяют поведение смеси на случай, если фактическое количество проездов существенно превысит проектное: смесь не должна при этом уплотниться до пористости ниже 2%. Эту проверку делают на дополнительных образцах.

Основные требования к объемному содержанию компонентов асфальтобетонной смеси, уплотняемой на жираторном приборе, даны в таблице 5. Как следует из таблицы, все смеси должны подбираться так, чтобы после  $N_{design}$  оборотов они имели пористость 4%, после  $N_{initial}$  оборотов их пористость была от 8,5% (для легкого движения) - до 11% и после максимального числа оборотов - не менее 98%.

### 3.4.2. Требования к уплотненной смеси.

В перечне требований Суперпейва к асфальтобетону (табл.5) задана минимальная пористость минеральной части асфальтобетона от 11% для крупнозернистой смеси (с максимальным номинальным размером зерен 37,5 мм) до 15% для мелкозернистой смеси. Тем самым предписывается содержание битума, находящегося в межзерновом пространстве (так называемого в США "эффективного" битума), в пределах от  $(11\%-4\%)=7\%$  до  $(15\%-4\%)=11\%$  по объему уплотненного асфальтобетона. Уместно отметить, что в отличие от этого российский ГОСТ 9128-97\* ограничивает не минимальную, а, наоборот, максимальную пористость минерального остова, которая не зависит от крупности смеси и для высокоплотных смесей равна 16%, а для плотных смесей - 19-22% в зависимости от содержания щебня в асфальтобетоне. При этом в российском ГОСТе заданы и воздушная пористость, и рекомендуемое содержание битума.

\* Взамен действует ГОСТ 9128-2009. - Примечание изготовителя базы данных.

Остановимся на широко используемом в США понятии об эффективном содержании вяжущего, которое в российской дорожной нормативно-технической литературе не встречается. Речь идет о том, что часть битума адсорбируется каменным материалом и находится внутри его зерен (см. рис.12).

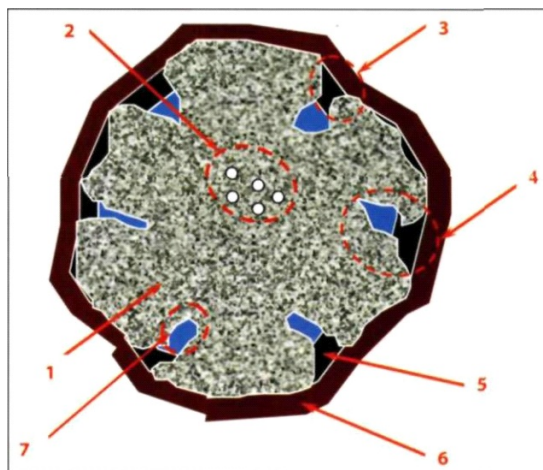


Рис.12. Иллюстрация понятий об адсорбированном и эффективном битуме

1 - каменное зерно; 2 - замкнутые непроницаемые для битума и воды поры внутри камня; 3 - поры проницаемые для битума т.е. адсорбирующие битум; 4 - водопроницаемые поры, объем которых считается частью объема каменного материала при вычислении его средней плотности  $G_{sb}$ ; 5 - адсорбированный битум; 6 - эффективный битум - именно он склеивает каменные зерна; 7 - часть водопроницаемых пор, не заполненная битумом, объем этих пор считается частью объема Каменного материала при вычислении его эффективной плотности  $G_{se}$

Как уже говорилось, для характеристики максимально возможной плотности асфальтобетонной смеси в США используют величину  $G_{mm}$  равную отношению массы неуплотненной смеси к ее объему (объему вытесненной смесью жидкости), т.е. "теоретическая плотность"  $G_{mm}$  - это суммарная масса каменного материала и битума, деленная на их суммарный объем, - плотность асфальтобетонной смеси, не имеющей воздушных пор. Ее определяют по стандарту ASTM D2041 или же AASHTO T209, которые принципиально не отличаются от приведенного в ГОСТ 12801-84\* определения истинной плотности асфальтобетона  $\rho^a$  пикнометрическим методом: образец смеси взвешивают, высыпают в колбу, заполняют водой, выдерживают под вакуумом, чтобы убрать воздушные пузырьки, доливают воду до метки, соответствующей известному объему сосуда, и взвешивают сосуд со смесью и водой.

\* Взамен действует ГОСТ 12801-98. - Примечание изготовителя базы данных.

Как уже говорилось, американская и российская методики принципиально не отличаются, но различаются по тщательности отработки и точности определения: американская предусматривает массу испытываемой смеси примерно в 10 раз большую, чем российская; в американской даны температурные поправки на изменение объемов битума, камня, воды и даже емкости колбы в случае, если температура помещения отличается от 20 или 25 °C и т.д.

В итоге объем стандарта, особенно ASTM D2041, раз в 10 больше российского, но и требуемая американским стандартом точность определения больше на одну значащую цифру после запятой. Это имеет практическое значение, в частности, при контроле качества уплотнения с помощью отношения фактической средней плотности асфальтобетона к максимально возможной  $G_{mb}/G_{mm}$ .

Перед основным испытанием на приборе жираторного уплотнения готовят 4-5 вариантов минеральных смесей, составленных из различных фракций каменного материала. Задаются типичным содержанием битума, которое для материала с плотностью  $G_{sb} = 2,65$  принимают примерно 3,5; 4; 4,5; 5 и 5,5% для смесей номинального максимального размера 37,5; 25; 19; 12,5 и 9,5 мм, соответственно. Как правило, испытывают не менее двух параллельных образцов. При диаметре 150 мм и высоте примерно 115 мм для каждого из них требуется примерно 4,7 кг каменного материала.

Определяют температуру смешения и уплотнения образцов. Для этого на капиллярном вискозиметре при нескольких температурах определяют кинематическую вязкость битума и устанавливают температуру смешения, как ту температуру, при которой вязкость битума составляет

170 ± 20 сантистоксов (0,17 ± 0,02 Па. сек), и температуру уплотнения смеси, как температуру, при которой вязкость битума составляет 280 ± 30 сантистоксов (0,28 ± 0,03 Па/сек). Практически температура смешения не превышает 165 °С, а температура лабораторного уплотнения должна быть не меньше 115 °С. Затем рыхлую смесь слоем 25-50 мм укладывают на металлический поддон и выдерживают в печи при температуре уплотнения в течение двух часов, чтобы подвергнуть битум старению. Затем часть смеси отделяют для определения максимальной плотности  $G_{mm}$  и последующего расчета показателя адсорбции  $R_{ba}$ . Для этого требуется дополнительно от 1 до 2,5 кг смеси в зависимости от ее крупности. Поскольку адсорбция битума происходит во времени, то, как показал опыт, при  $R_{ba}$  свыше 2% нужно выдерживать смесь в печи 4 часа.

Затем смесь уплотняют на жираторном приборе при постоянном давлении 0,6 МПа и угле наклона 1,25° до проектного числа оборотов  $N_{design}$  (табл.4). В процессе уплотнения высота образца автоматически измеряется и регистрируется. После 5-минутного остывания образец выжимают из цилиндра для последующего уточнения его объема гидростатическим взвешиванием. Эту поправку вводят в компьютер, который затем выдает среднюю плотность  $G_{mb}$ , полученную после различного числа оборотов. Полученные данные анализируют и сравнивают с требованиями таблицы 5.

### Требования к объемному содержанию компонентов асфальтобетона

Таблица 5

Движение ESALS*, млн	Требуемая плотность $G_{mb}/G_{mm}$ (% от теоретической массы)			Мах. пористость минеральной части асфальтобетона % при размере зерен, мм					Доля пор заполненных вяжущим, %	Отношение массы частиц мельче 0,075 мм к массе эффективного вяжущего
	$N_{initial}$	$N_{design}$	$N_{max}$	37,5	25	19	12,5	9,5		
< 0,3	≤ 91,5	96	≤ 98	11	12	13	14	15	70-80	0,6-1,2
0,3-3	≤ 90,5								65-78	
3-10	≤ 89,5								65-75	
10-30										
> 30										

После окончания объемного проектирования состава смеси она должна быть проверена на водостойкость и морозостойкость. Для этого испытывают на раскол цилиндры, подвергнутые водонасыщению и замораживанию. Образцы должны иметь прочность не ниже 0,70 от первоначальной. Этот метод считается несовершенным и сейчас интенсивно дорабатывается. Имеется много других предложений.

Кроме испытания на водостойкость, никаких других механических испытаний асфальтобетона на первом уровне проектирования состава смеси не предусмотрено. Эти испытания должны производиться для дорог с более интенсивным движением - на уровнях 2 и 3. На основе этих испытаний дается количественный прогноз будущего поведения покрытия в эксплуатации.

Изложенные выше положения системы Суперпейв были в основном разработаны до 1998 года. В настоящее время осуществляется внедрение этой системы и накоплен значительный опыт. Интенсивно разрабатываются методы испытаний и прогноза для уровней 2 и 3.

Литература:

Б.С.Радовский. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. Киев - 2003 год.

В.К.Апестин. Программа дорожных исследований в штате Миннесота (США). "Дороги" 1998 год, N 3.



Б.С.Радовский. Методы проектирования состава асфальтобетонных смесей в США. 2006 год.

Электронный текст документа  
подготовлен ЗАО "Кодекс" и сверен  
по авторскому материалу:  
Автор: Василенко С.Д. - начальник ПТО,  
строитель-технолог (стаж 30 лет),  
Санкт-Петербург, 2012

ИС «Кодекс: 6 поколение» Интранет