



Радовский Б. С.,  
д. т. н., проф.  
(Internet Laboratories, Inc., США)

## МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В США

Асфальтобетонное покрытие состоит из одного или нескольких слоев, которые обычно содержат примерно 84–90% каменного материала, 7–12% битума и 3–8% воздушных пор по объему уплотненной смеси. Все свойства асфальтобетона зависят от свойств битумного вяжущего, состава смеси, свойств каменного материала и сцепления между битумом и поверхностью камня.

### Развитие технологии асфальтобетона и методов подбора состава смеси

Интересно и поучительно проследить за основными этапами развития инженерной мысли в области проектирования состава смеси и технологии производства асфальтобетона на примере США.

Примерно 140 лет назад бельгийский химик Edward J De

Smedt обнаружил, что сопротивление деформированию смеси песка и битума можно повысить путем надлежащего выбора содержания в ней вяжущего. После эмиграции в США, работая в Колумбийском университете, он в 1870 году запатентовал песчаный асфальтобетон с соотношением содержания битума и песка 1:5 (патент США 103.581 — рис. 1). В том же году под его руководством был устроен небольшой участок с таким покрытием в г. Ньюарке (штат Нью-Джерси), а в 1877 году сделано покрытие на центральной улице столицы США г. Вашингтона площадью 45000 м<sup>2</sup> (первая половина которого была построена из смеси песка с природным асфальтом, доставленным с острова Тринидад, а вторая — из горного природного асфальта, импортированного из Франции). Песчаный асфальтобетон в виде смеси песка с тринидадским озерным асфальтом оказался лучше. Тринидадский асфальт содержит 50–57% битума и коллоидную глину вулканического происхождения, характеризуется плотностью 1,42 г/см<sup>3</sup>, температурой размягчения 93–97 °С и глубиной проникания стандартной иглы (пенетрацией) 3–10.

За успехом песчаного асфальтобетона последовало строительство других покрытий. На многих из них, однако, вскоре появились трещины. Было решено, что это вызвано чрезмерной жесткостью тринидадского вяжущего. В 1899 году был разработан ме-

тод испытания битума на пенетрацию. Стало ясно, что чрезмерная жесткость битума действительно приводит к быстрому растрескиванию покрытия, и было предложено применять менее вязкие битумы, достигая нужной жесткости материала покрытия добавлением мелкозернистого материала в смесь с битумом меньшей вязкости. С 1883 года главным поставщиком тринидадского природного озерного асфальта стала компания, которую основал A. L. Barber (российским дорожникам известны современные асфальтоукладчики компании Барбер-Грин; F. V. Greene был первым вице-президентом этой компании). Уже к 1898 году эта компания уложила песчаный асфальтобетон более чем в сотне городов на улицах общим протяжением 1500 миль (2400 км). В отсутствие конкурентов цена составляла до 6 долларов за м<sup>2</sup> покрытия, а впоследствии при 3–4 конкурировавших фирмах снизилась до 3,5–4,0 долларов за м<sup>2</sup>.

Подбором смеси и контролем качества в компании Barber Asphalt Paving Company занимался выпускник Гарварда химик К. Ричардсон (C Richardson), придававший особое значение зерновому составу минерального материала, особенно — непрерывности гранулометрической кривой в области частиц мельче 0,5 мм. Он дозировал минеральный порошок в зависимости от зернового состава песка, поставлявшегося из каждого большого карьера, и держал рабочие формулы смесей в секрете.



Хорошая видимость разметки покрытия — одно из важнейших требований его эксплуатационного состояния.

С учетом содержания пылевых частиц в песке и в озерном асфальте получалось, что рекомендовавшиеся Клиффордом Ричардсоном смеси содержали до 13 % частиц мельче 0,075 мм (фракции минерального порошка).

К. Ричардсон считается в США классиком в области технологии асфальтобетона. Он написал в 1905 г. первую книгу, посвященную этой технологии; ввел понятия пористости минерального остова и пористости асфальтобетона, а также описал предложенный им же метод определения оптимального содержания битума. Для этого образец песчаной асфальтобетонной смеси прижимали к листу плотного картона с гладкой поверхностью. Затем образец удаляли и рассматривали пятно, оставшееся на картоне. Если оно было темным, это означало избыток битума, если светлым, то надо было добавить битум, а пятно средней интенсивности отвечало оптимальному битуму. Фактически это был первый метод проектирования состава смеси. Так развивалась в США технология песчаного асфальтобетона (sheet asphalt).

Технология щебеночного асфальтобетона появилась в США благодаря Фредерику Уоррену (F. J. Warren). С 1890 г. он занимался кровельными работами с применением битума, а затем заинтересовался дорожным строительством. Ф. Уоррен быстро пришел к пониманию того, что дорожники не сформулировали технических требований к песку, не имеют правил подбора и испытания смесей и расходуют слишком много дорогого битума на приготовление песчаного асфальтобетона. Он поставил такой замечательный опыт — изготовил образец камня в виде правильного куба с длиной ребра 30 см и взвесил его. Затем разбил его на кубообразные части размером 5 см и заполнил ими деревянный ящик с внутренними размерами 30×30×30 см. В ящик поместилось лишь около половины веса исходного каменного куба, а остальной объем ящика приходился на воздушные поры. Однако, постепенно измельчая камень и заполняя ящик,

он убедился, что при определенной пропорции частиц разного размера можно заполнить камнем до 90 % объема ящика. Затем он задумался над связью величины поверхности каменного материала с требуемым содержанием битума в смеси.

В 1901 г. Ф. Уоррен отправил заявку на патент на покрытие из асфальтобетонной смеси, содержащей дробленый каменный материал. В патенте (номер 727.505) он указал, что каменный материал должен содержать от 50 до 80 % частиц крупнее 0,63 мм и мельче 75 мм, а «мельчайшего порошка» в нее нужно добавлять от 1 до 3 %. При этом под «мельчайшим порошком» понимались частицы, прошедшие сквозь сито с 200 отверстиями на площади один квадратный дюйм (поэтому его называют ситом номер 200) диаметром 0,075 мм. Сейчас мы его называем минеральным порошком. В описании изобретения Ф. Уоррен подчеркнул, что поры в песке занимают не менее 20 % объема и их большая часть должна быть заполнена битумом, тогда как применение щебня позволяет уменьшить пористость до 10 %. В итоге, за счет рационального подбора зернового состава минерального материала он добился уменьшения пористости минерального остова, а поэтому уменьшил расход дорогостоящего битума примерно в два раза по сравнению с песчаным асфальтобетоном. Благодаря этому компания Warren Brothers снизила цену до 2,8 долларов за м<sup>2</sup> покрытия и стала сильным конкурентом.

В те далекие времена юристов в США было относительно немного (зато сейчас их в этой стране больше, чем во всем остальном мире, и не совсем очевидно, почему), но тем не менее асфальтовая компания Barber немедленно начала судебный процесс против Warren Brothers Co. Уменьшение расхода битума грозило снижением доходов компании Barber, которая в то время имела исключительные права на поставку тринидадского асфальта в США. Компания Barber пыталась доказать, что применение крупного кам-

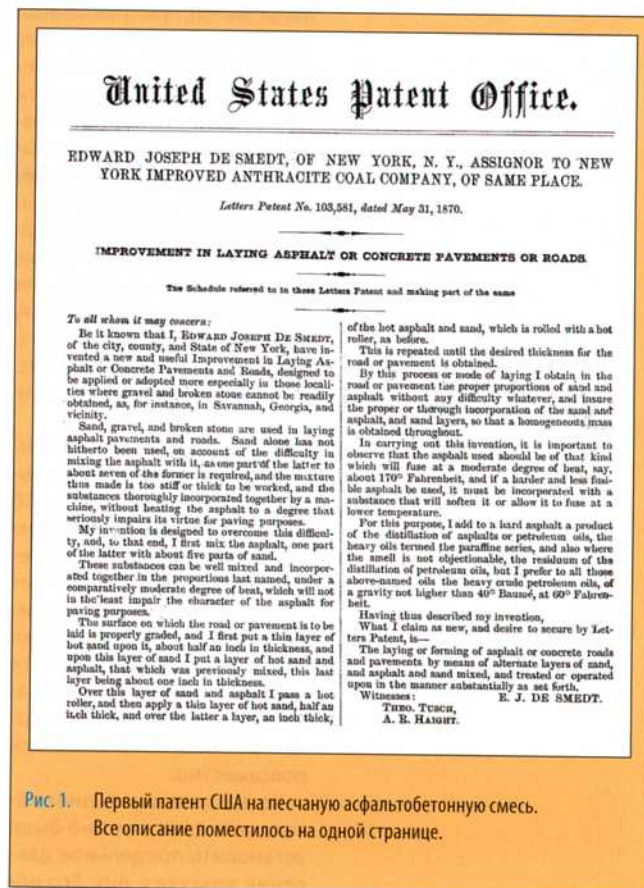


Рис. 1. Первый патент США на песчаную асфальтобетонную смесь. Все описание поместилось на одной странице.

ня в смеси ухудшает свойства покрытия по сравнению с песчаным асфальтобетоном. Кроме того, инженеры компании Barber, пользовавшейся большим авторитетом, стали повсюду развяснять недостатки смесей, в которых применяется крупный щебень: расслоение при перевозке, когда крупные зерна «всплывают», а мелочь накапливается внизу, что приводит к неоднородности смеси; трудность укладки и уплотнения, а поэтому снижается производительность; неровное покрытие и так далее. Действие патента Ф. Уоррена было приостановлено, но судебный процесс фирма Barber проиграла.

Практика же показала, что на покрытии из песчаного асфальтобетона при проезде конных повозок, имевших колеса с узким жестким ободом, колея образует быстрее, чем на покрытии из щебеночного асфальтобетона. После успешного строительства покрытия в г. Топека (шт. Канзас) в 1909 г. в суд обратилась уже компания Warren Brothers, поскольку впервые был применен ас-

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

фальтобетон, приготовленный с применением мелкого щебня. Суд постановил, что ограничение максимальной крупности щебня 12,5 мм не нарушает патента Уоррена, в котором было указано верхнее значение 75 мм. Это стимулировало применение мелкозернистых щебеночных асфальтобетонных смесей, которые проявили себя более технологичными, имели более гладкую поверхность, чем крупнозернистые, и работу с ними было легче механизировать.

К 1912 году компания Warren Brothers уложила асфальтобетонные покрытия в 150 городах, выдавая пятилетнюю гарантию их службы до ремонта. Даже при этом за счет уменьшения содержания битума получалась экономия около 3 долларов на м<sup>2</sup>. Хотя действие патента Уоррена закончилось в 1921 г., мелкозернистые смеси использовались повсеместно.

Когда появились пневматические шины, нужно было установить предельное давление воздуха в них. Его определяли так, чтобы не образовывалась глубокая колея на покрытиях из мелкозернистого щебеночного асфальтобетона типа Торека mix (то есть той самой смеси, которая была впервые применена

в г. Топека, шт. Канзас в 1909 г.). Исходя из этого, предельное давление в шинах приняли равным 400 кПа (4 атмосферы), и таким оно оставалось еще несколько десятилетий. Однако в дальнейшем с повышением осевых нагрузок, давления в шинах и интенсивности движения наметилась тенденция возвращения к крупнозернистым смесям с высоким содержанием щебня, чтобы уменьшить глубину колеи.

#### Методы, основанные на механических испытаниях

##### Метод Хаббарда-Филда

Первый метод оценки оптимального содержания битума в смеси, предложенный К. Ричардсоном и описанный выше, был чисто визуальным. До 1920-х годов никаких количественных методов, основанных на механических испытаниях смеси, в США не существовало. Первый такой метод предложили в середине 1920-х годов Р. Hubbard и F. Field (метод Хаббарда-Филда).

К этому времени асфальтобетон как материал для дорожных покрытий завоевал лидирующее место. В двенадцати крупнейших городах страны

54 % площади покрытий приходилось на асфальтобетон, 13 % на не укрепленный вяжущим щебень, 15 % — каменную мостовую, 13 % — клинкерную мостовую, 2 % — деревянную мостовую и 3 % — на цементобетон. Необходимо было создать стандарт, который бы предъявлял технические требования к асфальтобетону. П. Хаббард в эти годы, работая секретарем комитета по дорогам и дорожно-строительным материалам Американского общества испытаний и материалов (ASTM), основал асфальтовую лабораторию, превратившуюся впоследствии в известный Асфальтовый институт.

Требовалось, чтобы подобранные смеси были приготовлены в лаборатории и испытаны. Метод Хаббарда-Филда состоял в продавливании уплотненного образца из испытываемой смеси. Цилиндрический образец диаметром 50 мм и высотой 25 мм продавливали через круглое отверстие диаметром 44 мм на дне металлического патрубка. Испытание проводили при температуре 66 °С, соответствующей максимальной температуре поверхности покрытия летом на значительной части территории США. Максимальную нагрузку (в килограммах), которую потребовалось приложить к образцу при испытании со скоростью 60 мм/мин, записывали как показатель «устойчивости» смеси. Подразумевалось, что она характеризует сопротивление асфальтобетона образованию колеи при проезде автомобилей. Требуемый показатель устойчивости нормировался в зависимости от интенсивности движения.

Прибор Хаббарда-Филда широко применялся во многих штатах. В 1950-х диаметр образца был увеличен до 150 мм, а высота до 50 мм для испытания смесей с размером зерен до 19 мм, но модифицированная версия прибора использовалась недолго в связи с распространением метода Маршалла в этот период. Любопытно, что в России в 1990-х главный инженер объединения «Дорстройпроект», канд. техн. наук Ю. Е. Никольский предложил использовать аналогичный прибор.



Перекресток улиц Wilshire и Sepulveda в Лос-Анджелесе находится в первой десятке по количеству ДТП в стране. Число ДТП в прошлом году снизилось после дополнительной разметки и установки телекамер, фиксирующих проезд на поздний желтый — красный сигнал светофора.



Хорошую видимость в продольном профиле не всегда удастся обеспечить в большом городе даже для относительно недавней застройки.

Оценивая метод Хаббарда-Филда с позиций сегодняшнего дня, целесообразно отметить следующее. Испытание косвенно характеризует предельное сопротивление сдвигу материала в момент его разрушения при однократном нагружении. Это предельное сопротивление отражает влияние как удельного сцепления «с», так и угла внутреннего трения «φ», которые входят в закон Ш. Кулона для предельного касательного напряжения  $\tau_{max} = \sigma \cdot \tan \varphi + c$ , при достижении которого возникает необратимое пластическое течение идеального упругопластического материала. Предполагается, что если под действием приложенной нагрузки в самой опасной в отношении сдвига точке покрытия появляются нормальное напряжение «σ» и касательное напряжение «τ», которое меньше предельного «τ<sub>max</sub>», то необратимый сдвиг не произойдет, то есть считается, что в этом случае после проезда автомобиля якобы нет остаточной деформации.

На самом же деле асфальтобетон не является идеальным упругопластическим телом. Даже напряженное состояние, далекое от предельного, вызывает в нем как упругую и вязкую, так и необратимую пластическую деформацию. Необратимое вертикальное перемещение от одного проезда грузового автомобиля имеет порядок 0,0001 мм при том, что полное перемещение

(прогиб) имеет порядок 0,1 мм. Поэтому, измеряя полный прогиб, трудно одновременно измерить 1/1000 часть его. Кроме того, часть остаточного перемещения обусловлена необратимыми деформациями грунта и щебеночного основания, особенно при тонком покрытии. Эта его часть практически не связана с прочностью асфальтобетона на сдвиг.

Накопление столь малых перемещений после многократных проездов (порядка 100000 и больше), неравномерно распределенных по ширине покрытия, и приводит к образованию колеи глубиной 10–50 мм. При этих повторных деформациях асфальтобетон может сохранять сплошность и его структура (взаимное расположение частиц и связь между ними) далека от предельной. На микроструктурном уровне малые остаточные деформации могут, например, объясняться выжиманием части битума из зоны контакта зерен. При этом зерна сближаются, но не сдвигаются относительно друг друга. В отличие от этого, во время испытания на прочность при однократном срезе структура материала разрушается полностью и необратимо.

Испытание же по Хаббарду-Филду предполагает, что чем прочнее материал на сдвиг, тем лучше он сопротивляется накоплению деформаций при повторяющихся малых нагрузках, что, к сожалению, не под-

тверждается. Это замечание не должно быть прочитано просто как ретроспективный взгляд на историю технологии асфальтобетона. Оно актуально и сегодня. Так, в стандарте России на асфальтобетон (ГОСТ 9128–97, Изменение № 2, введенное с 1.09.2002) нормированы упомянутые параметры предельного сопротивления сдвигу «φ», «с» при 50 °С.

Они нормированы впервые (по предложению канд. техн. наук Г. Н. Кирюхина), что можно считать шагом вперед по сравнению с предыдущими российскими стандартами. При этом подразумевается, что чем выше «φ» и «с», тем лучше сопротивляется асфальтобетон образованию колеи. Возможно, что в некоторых случаях это действительно так. Однако может оказаться, например, что введение в битум полимера практически не изменяет значений «φ» и «с», то есть что сопротивление сдвигу якобы не увеличивается, хотя стоимость смеси возрастает. На самом деле введение полимера существенно уменьшает колею, но не за счет роста предельного сопротивления материала разрушенной структуры, а за счет уменьшения доли остаточных деформаций при повторяющихся малых напряжениях — добавка полимера повышает эластичность битума, а значит, и асфальтобетона.

### Метод Хвима

Так сложилось, что в дорожном департаменте штата Калифорния было разработано довольно много методов испытаний материалов и грунтов, получивших признание в других штатах и у строителей других государств. Например, в 1930-х инженер из Лос-Анджелеса Р. Проктор (R. R. Proctor) разработал метод и прибор для оценки степени уплотнения грунта, принятый и сейчас в разных странах, в том числе в России. В этом же городе был предложен метод испытания щебня на истираемость (всем известный лос-анджелесский барабан). В этом же штате был разработан используемый до сих пор во многих странах показатель несущей способности

грунтов CBR (California Bearing Ratio).

Основные положения метода Ф. Хви́ма (Francis Hveem) были также разработаны инженером дорожного департамента штата Калифорния в конце 1920-х – конце 1930-х годов и до сих пор применяются в этом и в некоторых других штатах. Кроме того, отдельные элементы этого метода оказали влияние на последующие методы и приборы для проектирования состава асфальтобетонной смеси, используемые в разных странах, включая Россию.

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.

Одним предложением всю «философию» метода Ф. Хви́ма 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. 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 и приведенные в действующем по сей день «Руководстве» Асфальтового института [2].

Ф. Хвим использовал для этих коэффициентов данные, полученные экспериментально канадским инженером Л. Эдвардсом (L. N. Edwards) применительно к цементобетонной смеси. Очевидно, что, скажем, материал, прошедший сквозь сито  $2,36 \text{ мм}$  и задержанный на сите  $1,18 \text{ мм}$ , то есть так называемый остаток на сите  $1,18 \text{ мм}$ , включает частицы всех размеров от  $1,18$  до  $2,36 \text{ мм}$ . Капитан Л. Эдвардс проделал титаническую работу: он вручную определил размеры каждого зерна в каждой фракции, вычислил его поверхность и объем и таким путем нашел удельную поверхность зерен каждой фракции, опубликовав результаты в виде статьи в 1918 г. Данными Эдвардса воспользовался Хвим, однако он не располагал сведениями о поверхности очень мелких фракций, размеры частиц которых Эдвардс измерить не мог. Это создало серьезные

трудности, поскольку именно мелкие фракции имеют большую удельную поверхность. К тому же принципиально невозможно учесть сколь угодно малые частицы, поскольку с приближением их размера к нулю поверхность частиц любого данного объема становится бесконечной. Каким-то размером надо было ограничиться.

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). Аналогичная техника расчета содержания битума была в 1970-х

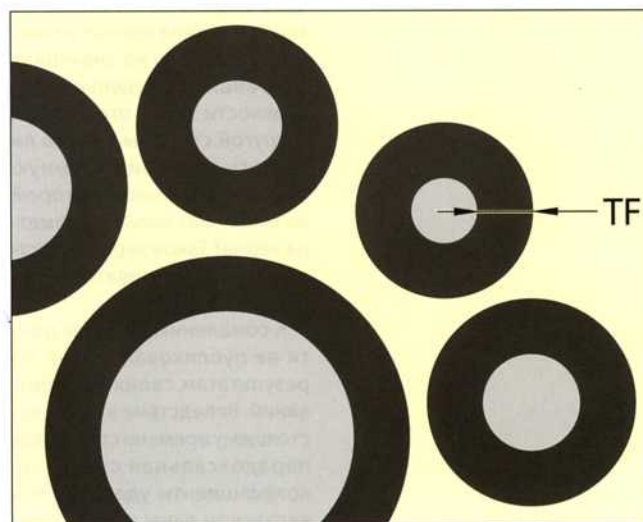


Рис. 2. Иллюстрация определения понятия о толщине пленки по Ф. Хвиму. Асфальтобетонная смесь рассматривается как совокупность частиц с битумными оболочками постоянной толщины TF без учета влияния уплотнения.

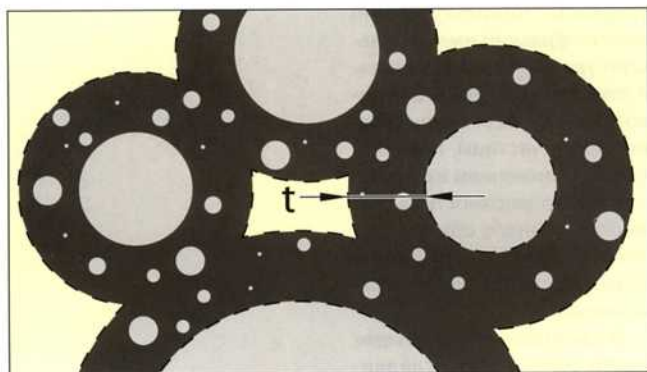


Рис. 3. Иллюстрация определения понятия о толщине пленки  $t$  в работе [3]. Частицы минерального материала, имеющие диаметр меньше толщины пленки, считаются частью вяжущего вещества. Чем выше степень уплотнения, тем толще пленка.

предложена в ХАДИ И. В. Королевым, впоследствии — профессором МАДИ, и названа им методом определения битумоемкости.

Каким же минимальным размером частиц ограничился Хвим? Это не совсем ясно, поскольку последний коэффициент удельной поверхности дан для частиц диаметром меньше 0,075 мм, и он равен  $33 \text{ м}^2/\text{кг}$  [2]. В то же время фактически измеренная удельная поверхность таких частиц, например для портландцемента, имеет порядок  $100\text{--}1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ . 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.

К сожалению, Ф. Хвим почти не публиковал статей по результатам своих исследований. Вследствие этого к настоящему времени сложилась парадоксальная ситуация: коэффициенты удельной поверхности даны в нормативных документах и в справочниках (например, [2]), но специалисты не имеют детальных сведений о том, как они

получены и в каких пределах применимы. Лишь в 2004 году часть таких сведений стала доступной после того, как Калифорнийский департамент транспорта выложил на Интернетe отсканированные научно-технические отчеты 1930–50-х годов по адресу [http://www.dot.ca.gov/research/researchreports/translabreports/1930-1955\\_lab\\_reports.htm](http://www.dot.ca.gov/research/researchreports/translabreports/1930-1955_lab_reports.htm)

Как ясно из изложенного, Ф. Хвим и его последователи, включая проф. И. В. Королева, фактически рассматривали асфальтобетонную смесь как совокупность частиц с битумными оболочками, не прикасающимися между собой, как если бы они висели в воздухе (рис. 2) — 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. 3.

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, как показано в работе [3], 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.

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 неперменной 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, изме-

ря 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. В связи с этим интересно отметить, что практически в то же время — в 1930-х годах грунтовые стабилометры были созданы в Научно-исследовательском институте гидротехники в Ленинграде.

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 подверга-



Бортовой камень, объединенный с боковой канавой, выполняется только в монолитном цементобетоне. В красный цвет окрашен бортовой камень там, где остановка запрещается.

ря 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. В связи с этим интересно отметить, что практически в то же время — в 1930-х годах грунтовые стабилометры были созданы в Научно-исследовательском институте гидротехники в Ленинграде.

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. Хви́ма 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. Хви́ма, 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 Хви́ма 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 подверга-



Бортовой камень, объединенный с боковой канавкой, выполняется только в монолитном цементобетоне. В красный цвет окрашен бортовой камень там, где остановка запрещается.

