

# ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК И АГРЕССИВНЫХ СРЕД

**В. А. Золотарев,**

докт. техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой технологии  
дорожно-строительных материалов,  
ХНАДУ (Харьков)

## Об авторе



Закончил Харьковский институт железнодорожного транспорта (факультет промышленно-гражданского строительства) в 1960 году.

В 1962-1966 гг. аспирант кафедры дорожно-строительных материалов ХАДИ. Под руководством проф. М. И. Волкова в 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 1964-1965 гг. (10 месяцев) стажировался под руководством Генерального инженера дорог и мостов Франции Р. Сотрэ в Центральной лаборатории дорог и мостов в Париже. С 1969 по 1985 гг. тесно сотрудничал с лабораторией реологии полимеров Института нефтехимического синтеза АН СССР. В 1983 г. во Всесоюзном заочном инженерно-строительном институте (ВЗИСИ) защитил докторскую диссертацию «Закономерности деформирования и разрушения битумов и асфальтобетонов как основа улучшения и регулирования их свойств». Оппонентами выступили И. А. Рыбьев, Н. В. Горелышев и Н. Б. Урьев.

С 1985 г. профессор, с 1992 года зав. кафедрой технологии дорожно-строительных материалов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ). С 1996 по 2007 год член Технического комитета «Нежесткие дороги» Всемирной дорожной Ассоциации, с 2002 года ассоциированный член Технического комитета ТС 336 «Битумные вяжущие» Европейского Комитета по нормализации (СЕН). Опубликовал 430 работ, среди них 23 в дальнем зарубежье. Подготовил 2 докторов и 26 кандидатов технических наук. Участник Всемирных дорожных конгрессов (Монреаль-1995, Куала-Лумпур-1999, Париж-2007); Конгрессов «Евроасфальт-Евробитум» (Люксембург-1999, Барселона-2000, Вена-2004, Копенгаген-2008); симпозиума RILEM (Лион-1997, Цюрих-2003).

Заслуженный деятель науки и техники УССР, кавалер Ордена «За заслуги» второй и третьей степени.

## Общие представления о долговременной прочности применительно к асфальтобетону.

Традиционная оценка качества асфальтобетонов осуществляется по механическим (прочностным и деформационным) и традиционным физическим свойствам. К первым относятся, главным образом, прочность при различных схемах напряженного состояния, модули упругости в линейной зоне и предельные деформации. Ко вторым — показатели плотности (средняя плотность, пористость, водонасыщение), а также коэффициенты водостойчивости и морозостойкости.

Существует множество причин, по которым стандартизованные показатели не удовлетворяют профессионалов, так как по их значениям трудно судить о долговечности асфальтобетона как материала и тем более о долговечности асфальтобетонного покрытия. Используя их, нельзя предсказать, хотя бы ориентировочно, время жизни материала под нагрузкой или хотя бы предвидеть, насколько один вид асфальтобетона долговечнее,

живучее другого. Традиционные теории (предельных напряжений, деформаций или энергетическая) не преследуют такие цели и не ориентированы прямо на долговечность.

В то же время оценить долговечность материала по времени его жизни (ВЖ) под нагрузкой означает приблизить критерий оценки к реальным условиям его работы. Кроме того, временной характер критерия оценки свойств материалов обеспечивает высокую его чувствительность и взаимосвязь с состоянием, структурой материалов и особенностями их составов. Именно с этим связано бурное развитие с начала 40-х годов прошлого столетия реологии [1], которая изучает деформации и течение во взаимосвязи с условиями деформирования тел. Реологические подходы позволяют понять сущность механизмов деформирования, течения, пластичности, ползучести широкого круга тел.

Они непосредственно применимы к битумам, которые, по утверждению В. Филиппова [2], «несмотря на сложность их химического состава, являются очень удобными материалами для ис-

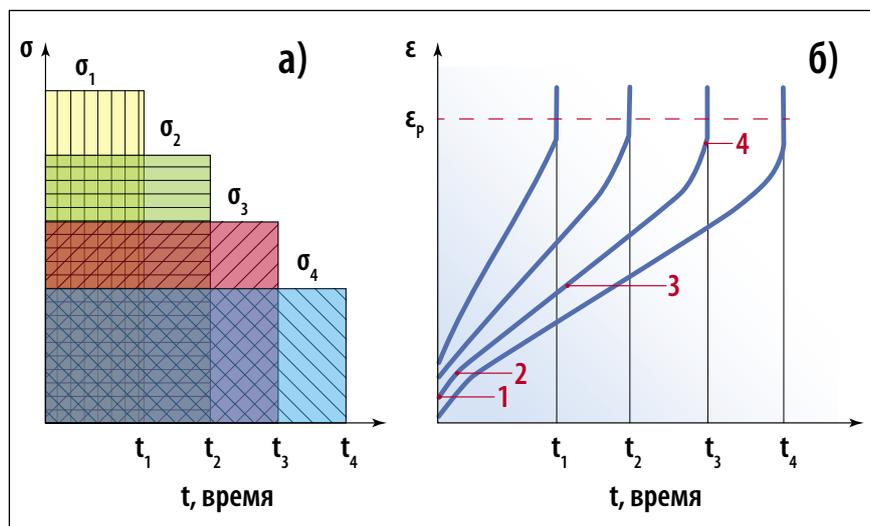
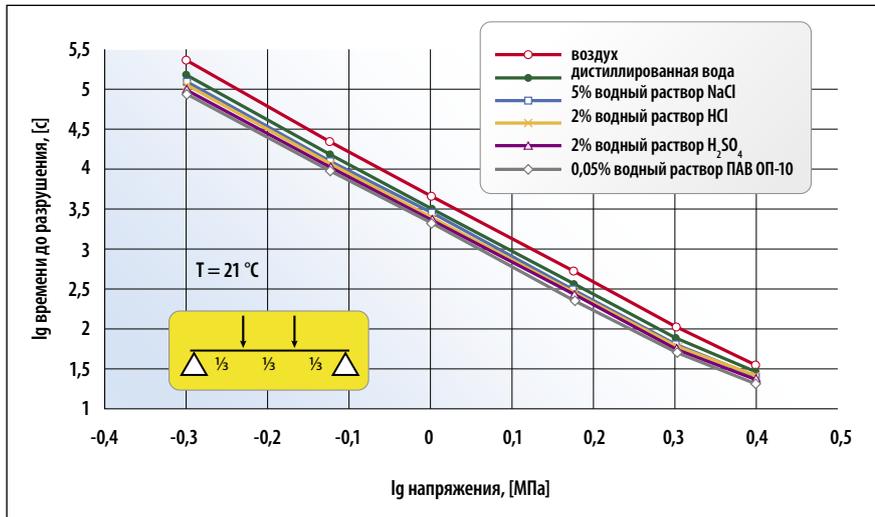


Рис. 1. Схема испытаний при постоянных напряжениях ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$ ) (а) и характер развития деформаций до разрушения ( $\epsilon_p$ ) за время  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$  (б)



**Рис. 2.** Зависимость времени до разрушения асфальтобетона тип «Б» с 4,5 % битума БНД 60/90 от напряжения при чистом изгибе

следования вязкоупругих свойств, так как ... их свойства изменяются в широких пределах с температурой и в значительной степени с частотой. Эти результаты представляются типичными для вязкоупругих жидкостей, причем свойства, найденные в других системах, в битуме проявляются особенно резко». Фундаментальные особенности реологических систем, типичным представителем которых является асфальтобетон, обусловлены релаксацией и ползучестью. Они оказывают влияние не только на поведение асфальтобетона при линейном и нелинейном деформировании, но определяют зависимость прочности от скорости механического воздействия, что впервые в СССР для асфальтобетона было показано Н. Н. Ивановым и М. Я. Телегиным [3] на примере зависимости прочности асфальтобетона от скорости нагружения.

Первый технический опыт оценки времени жизни (долговечности) материала под нагрузкой осуществлен А. Вейлером посредством установления количества циклов до разрушения при заданном растягивающем усилии, вызывающем напряжения ( $\sigma$ ) в металлическом тросе. Полученные результаты описывались уравнением:

$$N = K \cdot \sigma^{-b} \quad (1)$$

Этим положено начало изучению устойчивой выносливости материалов и конструкций при переменном циклическом воздействии и в более широком смысле долговечности материалов под действием циклического или статического нагружения [4]. В отношении асфальтобетона подтверждением такой позиции служит информация [5] о разработке «Методики прогноза усталости асфальтобетона по результатам его испытания на ползучесть».

Статическое нагружение выражается в приложении к образцу или конструкции, при принятой схеме напряженного состояния, серии нагрузок, вызывающих в них соответствующие напряжения, которые приводят к их разрушению за соответствующие каждой нагрузке отрезки времени. Такого рода испытания на ползучесть без учета ВЖ в СССР впервые описаны в 1953 г. Н. В. Горельшевым [6]. В качестве критерия долговечности (статической усталости) принимают время, необходимое для разрушения образца. Разрушение происходит после прохождения нескольких стадий (рис. 1): упругого (1), переходного от упругого к вязкому деформированию (2), течения с установившейся скоростью (3) и лавинного (4) нарастания деформации (разрушения).

По результатам таких испытаний можно построить зависимость времени жизни системы ( $t$ ) от напряжения (рис. 2). Активные исследования такого рода самых различных материалов относятся к 50–80-м годам прошлого века. Именно в этот период предпринимались попытки объяснения физико-химического механизма такого разрушения. В результате были предложены степенные зависимости время-напряжение (Тернер В., Голланд А.). Степенные зависимости, учитывающие энергию активации процесса деформирования и разрушения, предложены Бартевым Г. М. [7]. Экспоненциальные зависимости, трактуемые как результат термофлуктуационных процессов разрушения, глубоко изучены Журковым С. Н. с учениками [4]. В результате школы С. Н. Журкова сформулирована кинетическая теория прочности твердых тел, основанная на термофлуктуационной природе механического разрушения. Согласно этой теории, в основе разрушения лежит тепловое движение, выражающееся в термических флуктуациях, а ме-

ханическая нагрузка определяет вектор разрушения.

Простота эксперимента и возможность объяснить процесс разрушения фундаментальными понятиями и представлениями стали стимулом для применения метода статической усталости к асфальтобетону. В конце 60-х годов в ХАДИ были начаты исследования статической выносливости широкого круга асфальтобетона при положительных температурах в условиях сдвига [8]. При этом было показано [9], что в области достаточно больших (от 5 с до 7000 с) времен и малых напряжений (0,02 МПа) время их жизни (ВЖ) подчиняется степенной зависимости. При изменении температуры от 20 до 50 °С время жизни уменьшалось при постоянном напряжении в 190–200 раз, а при переходе от асфальтобетона на битуме БНД 60/90 к асфальтобетону на битуме БНД 130/200 — в 7–8 раз. В то же время значение пенетрации битума изменялось в 2,4 раза, а прочность асфальтобетона на сжатие в первом случае уменьшалась в 2–3 раза, а во втором при 50 °С в 1,9–2,0 раза. Дальнейшие опыты с многочисленными объектами четко свидетельствовали о том, что, время жизни гораздо чувствительнее к любым структурным факторам, чем прочность на сжатие и сдвиг.

Эти опыты привели к заключению, что для асфальтобетона, по крайней мере в диапазоне положительных температур (до 50 °С), зависимость ВЖ( $t$ ) от напряжения подчиняется степенному уравнению

$$t = B \cdot \sigma^{-b} \quad (2)$$

С учетом термофлуктуационного механизма разрушения согласно Г. М. Бартеву, оно имеет вид:

$$t = B \cdot \sigma^{-b} e^{\frac{U}{kT}} \quad (3)$$

где  $B$  и  $b$  — постоянные коэффициенты;  $U$  — энергия активации процесса разрушения;  $K$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Справедливость этого уравнения по отношению к асфальтовым системам блестяще подтверждается данными Н. В. Горельшева и В. М. Гоглидзе (рис. 3) [6, 10]. Первый изучал ползучесть при растяжении асфальтовых растворов при температурах минус 18 °С и плюс 18 °С, второй — течение асфальтовязущего с 80% минерального порошка при растяжении образцов-гантелей при температуре 17 °С. При этом В. М. Гоглидзе регистрировал характер развития деформации ползучести от начала загрузки до разрушения. Из этих исследований следовало, что кривые ползучести асфальтобетона имеют четко выраженный участок течения с постоянной вязкостью, в полном согласии с моделью Максвелла, и что предельная деформация слабо зависит от скорости те-

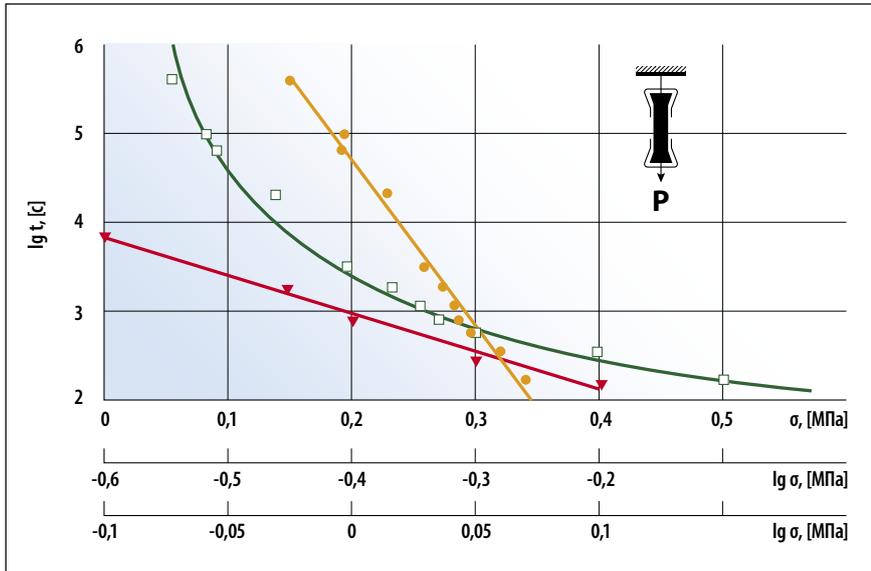


Рис. 3. Полулогарифмическая (1) и степенная (2) зависимости времени жизни асфальто вяжущего при серии постоянных растягивающих напряжений, по данным В.М. Гоглидзе [10] (шкала от -0,1 до 0,1), асфальтового раствора (3) по данным Н.В. Горельшева [6] (шкала от -0,6 до 0)

чения. Среди фиксируемых А. В. Гоглидзе показателей было время, в течение которого образцы находились под нагрузкой вплоть до разрушения. В [6, 10] зафиксированные времена до разрушения никак не использованы. Приведенные здесь зависимости (рис. 3)  $\lg t = f(\lg \sigma)$ , построенные по данным [6, 10], являются прямыми в диапазоне от 1,66 мин до 6635 мин, т. е. 4,6 суток. Отсюда следует полное совпадение скоростной зависимости прочности асфальтобетона, установленной проф. Н. Н. Ивановым, и временной зависимости, прочности, установленной, но не замеченной в [6, 10]. Такое согласие конечного результата независимых исследований, выполненных по разным методикам [3, 8], объясняется общим, в обоих случаях, механизмом деформирования и разрушения системы. Одним из проявлений его является конкуренция скорости механического воздействия и времени релаксации напряжений.

Результаты исследований [3, 8, 9] не подчиняются классическому экспоненциальному уравнению термофлуктуационной прочности С. Н. Журкова, в которой учитывается изменение энергии активации процесса разрушения под влиянием напряжения ( $\sigma$ ):

$$t = t_0 e^{\frac{(U_0 - \gamma\sigma)}{KT}} \quad (4)$$

где  $t_0$  — время колебания атомов относительно положения равновесия ( $10^{-13}$  с);  $U_0$  — начальная энергия процесса разрушения (потенциальный барьер);  $\gamma$  — структурный коэффициент, отражающий перенапряжения в материале.

Кроме того, температурные зависимости ВЖ асфальтобетона при положитель-

ных температурах не образуют верев прямых с точкой пересечения, отвечающей  $t=10^{-13}$  с, что соответствует периоду колебания атомов относительно положения равновесия соответствует [4]. Эти отклонения могут быть связаны с изменением структурных связей в битуме и на границе раздела фаз (битум — минеральная подложка) в процессе разрушения. Это могут быть межмолекулярные связи, в пользу чего свидетельствуют малые значения

энергии активации процесса разрушения (34–36 ккал/моль) и подобие температурных зависимостей долговечности и вязкости (рис. 4).

В области низких температур (от 0 до минус 40 °С) закономерности долговременной прочности асфальтобетонов также не подчиняются основному уравнению термофлуктуационной теории прочности [11]. Причиной этого могут быть, в соответствии с анализом, приведенным в [4], внутренние дефекты, вызываемые температурными микронапряжениями, нестабильность структуры в процессе деформирования, предшествующего разрушению. Подобные отклонения для различных тел в [4] объясняются: изменением структурного коэффициента  $\gamma$ , разориентацией, рекристаллизацией, т. е. неравновесностью систем в процессе деформирования. Вероятно, асфальтобетон является одним из таких аномальных тел, механизм разрушения которых является термофлуктуационным, но осложненным приводящей структурной нестабильностью. Это никоим образом не может быть причиной отказа от изучения долговременной прочности асфальтобетона. Свидетельством перспективности таких исследований стали последующие за работами [8, 9] публикации [12, 13, 14, 15, 16]. Более того, именно такой подход может существенно облегчить объективную оценку долговечности асфальтобетона с учетом совместности действия нагрузок, температуры, жидких агрессивных сред, циклического замораживания и оттаивания — увлажнения, высыхания — солнечного излучения и др. факторов.

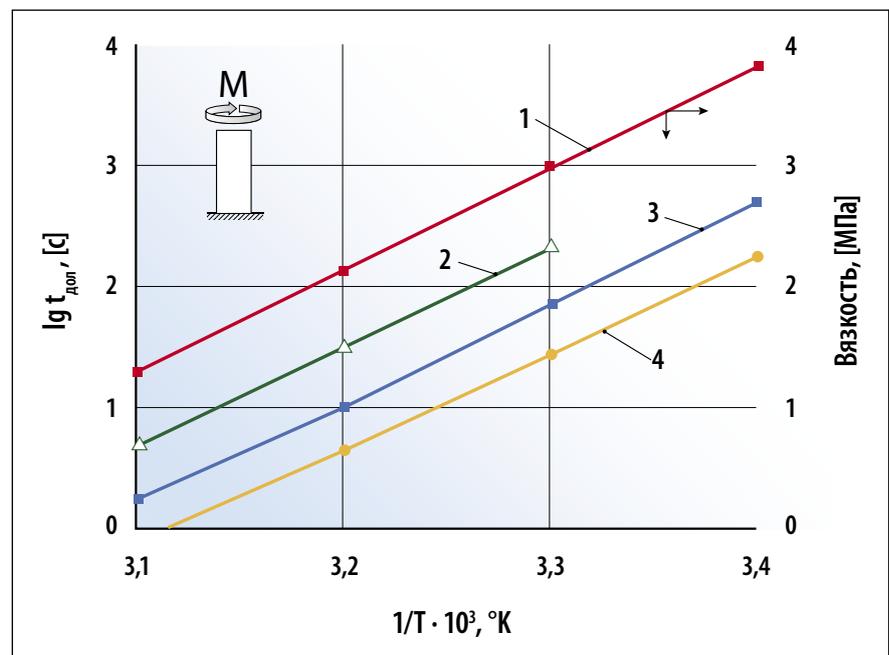


Рис. 4. Температурная зависимость вязкости холодного асфальтобетона на битумах БН-0 (1) и времени жизни холодного асфальтобетона на битумах БН-0 (2), Б-6 (3), Б-5 (4)

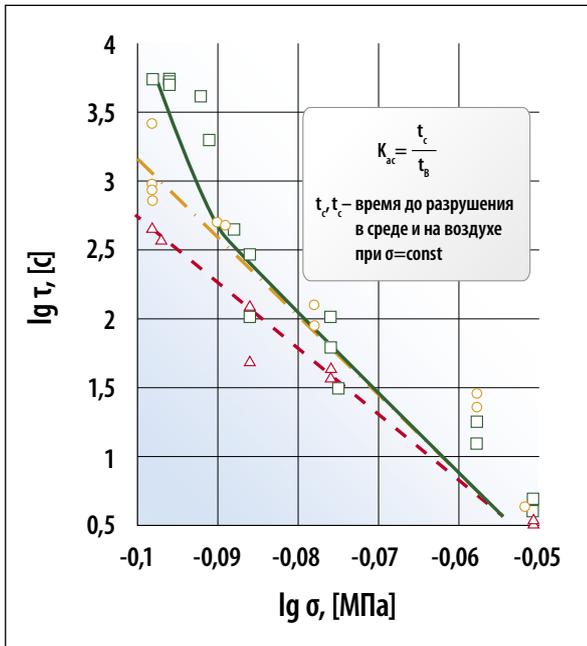


Рис. 5. Долговечность асфальтобетона холодного типа на битуме марки Б-5 при испытании при кручении: на воздухе - □, в воде - ○, в керосине - △

**Методика эксперимента и объекты исследования**

Приоритетным из приведенного перечня факторов представлялось исследование долговременной прочности асфальтобетона при совместном воздействии механических нагрузок и жидких агрессивных сред. Такое сочетание в отношении воды признано наиболее опасным со времени Дж. Мак-Адама [17] и остается таковым до настоящего времени [18]. При этом, однако, следует учитывать, что по сравнению с эпохой Дж. Мак-Адама на дорожное покрытие действуют еще более агрессивные жидкости: растворы солей и кислот, горюче-смазочные материалы, жидкие отходы производства и др. Системные работы по изучению влияния жидких агрессивных сред на статическую выносливость асфальтобетонов выполнены совместно с С. В. Ефремовым [19].

Методика выполнения эксперимента заключалась в осуществлении чистого изгиба (двумя сосредоточенными нагрузками) асфальтобетонной балки, находящейся в изучаемой жидкости, нагрузками разной величины. Фиксацию времени жизни под каждой нагрузкой с точностью до 5 осуществляли с помощью конечных выключателей. Испытания производили при температуре 21 °С. Температурные зависимости ВЖ асфальтобетона в средах изучали при 50, 35, 20 10 и 0 °С. Механическую нагрузку осуществляли путем использования рычажных прессов. Испытательный стенд включал 5 аналогичных приспособлений. По результатам напряжение — время жизни, ему отвечающее, строили зависимости, подоб-

ные тем, что приведены на рис. 2.

В качестве рабочих сред приняты: воздух, дистиллированная вода, водные растворы каменной соли (5%), соляной (2%) и серной кислоты (2%), поверхностно-активного вещества ОП-10 (0,05%).

Объектами исследований служили асфальтобетоны преимущественно типа Б на битумах разной консистенции по пенетрации. Краевые углы смачивания принятыми средами определяли на битуме, мраморе известняке, граните, кварце, слюде. Сцепление битумов с теми же подложками определяли в перечисленных выше средах.

Этим исследованиям предшествовали опыты [20], начатые в 1970 году (рис. 5). Они показали, что влияние воды на долговечность проявляется тем больше, чем меньше нагрузка, т. е. чем больше время жизни асфальтобетона. Это позволило высказать предположения о том, что активность сред связана со скоростью их распространения по порам, трещинам и дефектами, образующимися под действием нагрузки. При этом среда может распространяться по границе раздела фаз между битумом и каменным материалом, сквозь дефекты пленок битума на каменных материалах (около 20–25%), сформировавшиеся на стадии перемешивания смесей [21], по плоскостям наруше-

ния сплошности в самом битуме, образовавшихся по различным причинам.

**Поверхностные свойства агрессивных сред и их связь со сцеплением битумов с подложкой**

Такие предположения стали логической основой постановки задачи по изучению поверхностных свойств агрессивных сред: смачивания и поверхностного натяжения. Приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что порядок изменения по степени лиофильности всех подложек одинаков для всех сред. Значение краевых углов смачивания уменьшается по мере перехода от битума (89°) к мрамору и известняку (65°), граниту (31°), кварцу и слюде (16°), кварцевому стеклу (8°). Такой характер смачивания водой используемых подложек закономерен и обусловлен их составом. Углеродородный состав битума обеспечивает его почти водоотталкивающую способность; кварц и кварцевое стекло близки к идеальной гидрофильности, карбонатные породы в связи с меньшей твердостью их минералов (меньшей «условной полярностью») хуже смачиваются водой, чем кварц. В отношении смачивания битумом твердых подложек существует обратное правило, чем тверже горная порода, тем хуже она им смачивается, чем больше в породе темноцветных минералов, тем лучше она смачивается битумом.

В том, что касается смачивающей способности сред, то они располагаются в таком порядке от большого угла смачивания к меньшему: дистиллированная вода, 5% водный раствор NaCl; 2% водный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,05%; водный раствор неионогенного ПАВ ОП-10. Кислоты более активны, чем NaCl, что может объясняться в отношении битума наличием в нем ор-

Таблица 1. Поверхностные свойства агрессивных жидких сред

Поверхность	Краевой угол смачивания (θ) в град. различных поверхностей различными средами							
	Дист. вода	Талая вода	5% водн. р-р NaCl	2% водн. р-р HCl	2% водн. р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,002% водн. р-р ОП-10	0,005% водн. р-р ОП-10	0,05% водн. р-р ОП-10
Битум БНД40/60	88,8	87,4	80,9	61,6	57,7	54,4	38,2	34,4
Мрамор	64,6	65,4	63,1	-	-	56,5	39,5	33,8
Известняк	64,5	65,7	62,5	-	-	51,0	35,9	32,5
Гранодиорит	37,8	39,4	33,9	-	-	30,6	25,4	19,9
Гранит	30,9	31,2	29,9	26,4	23,0	29,9	26,7	21,2
Кварц	16,2	15,5	14,0	12,1	10,1	11,7	10,2	9,3
Слюда	16,5	15,4	12,2	15,4	14,6	10,8	9,6	7,2
Кварцевое стекло	8,4	8,7	8,6	6,5	6,7	8,3	3,2	4,9
Поверхностное натяжение (σ), мДж/м <sup>2</sup>	72,59	72,59	72,90	70,01	69,00	32,26	17,81	28,17
Водородный показатель (рН)	7,09	7,07	6,06	0,56	0,35	6,85	6,55	6,45
Плотность (ρ), г/см <sup>3</sup>	1,000	1,000	1,034	1,008	1,012	0,998	0,995	0,990

Таблица 2. Сцепление битумов разных марок с минеральными подложками в агрессивных средах

Поверхность	Сцепление (С) с минеральной поверхностью, %						
	Дист. вода	5 % водн. р-р NaCl	2 % водн. р-р HCl	2 % водн. р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,002 % водн. р-р ОП-10	0,005 % водн. р-р ОП-10	0,05 % водн. р-р ОП-10
<b>БНД 40/60</b>							
Мрамор (белый)	100	100/0	–	–	98/2	97/3	91/9
Известняк	100	100/0	–	–	100/0	98/2	94/6
Гранодиорит (чёрный)	78	80/–2	–	–	68/10	68/10	64/14
Гранит (серый)	69	67/2	63/6	61/8	57/12	55/14	52/16
Кварцевое стекло	47	46/1	44/3	45/2	40/7	39/8	36/11
<b>БНД 60/90</b>							
Мрамор (белый)	96	98/–2	–	–	85/11	84/12	80/16
Известняк	100	100/0	–	–	90/10	88/12	83/17
Гранодиорит (чёрный)	73	73/0	–	–	60/13	58/15	52/21
Гранит (серый)	62	61/1	60/2	58/2	52/10	50/12	45/17
Кварцевое стекло	39	37/2	34/5	32/7	29/10	27/12	22/17
<b>БНД 130/200</b>							
Мрамор (белый)	92	90/2	–	–	72/20	69/23	65/27
Известняк	95	96/–1	–	–	81/14	78/17	69/26
Гранодиорит (чёрный)	67	65/2	–	–	50/17	46/21	40/27
Гранит (серый)	55	52/3	48/7	46/9	37/18	32/23	26/29
Кварцевое стекло	29	26/3	24/5	23/6	19/10	14/15	7/22

Примечание: В знаменателе приведено изменение сцепления в средах по отношению к воде.

ганических кислот, в отношении гранита небольшим содержанием в нем основных минералов (роговой обманки). Раствор ПАВ обеспечивает наилучшее смачивание всех подложек, что связано с резким снижением поверхностного натяжения воды, в которую введено ПАВ (28,2 мДж/м<sup>2</sup> по сравнению с 72,6 мДж/м<sup>2</sup> для чистой воды). При этом вполне реализуется механизм смачивания, вытекающий из уравнения Юнга.

Принцип, согласно которому сцепление битума с подложкой тем больше, чем хуже среда смачивает подложку, четко подтверждается данными табл. 2. Для всех подложек сцепление уменьшается по мере перехода от дистиллированной воды, хуже всего смачивающей все подложки, к водному раствору ПАВ. То же самое относится к минеральному составу подложки: чем лучше смачивается подложка данной средой, тем хуже ее сцепление с битумом. Ранжировка сред по степени их агрессивности и подложек по степени лиофильности остается такой же, как в случае опытов по определению смачивания и поверхностного натяжения. Последнее при переходе от дистиллированной воды к раствору ПАВ снижается в 2,6 раза. Уровень изменения сцепления во всех средах и для всех подложек зависит от консистенции битума. Менее всего подвергается ухудшению сцепле-

ние со всеми подложками высоковязкого битума марки БНД 40/60. В зависимости от вида подложки сцепление этого битума в растворе ПАВ ухудшается на 6–16%, битума БНД 60/90 — на 17–21%, битума БНД 130/200 — на 22–29%.

Полученные результаты не только качественно, но и количественно подтверждают ранее установленные А. И. Лысихиной [22] и А. С. Колбановской факты в отношении роли подложки [23]. Больше того, эти результаты являются чувствительными к составу породы: темный гранитодиорит отличается от серого гранита по краевому углу смачивания водой на 7–8%, а по сцеплению — на 9–12%. Такие результаты могут

быть свидетельством преобладающей роли межмолекулярных сил в формировании адгезии битумов к минеральным поверхностям разной основности.

### Влияние агрессивных сред на долговечность асфальтобетонов под нагрузкой

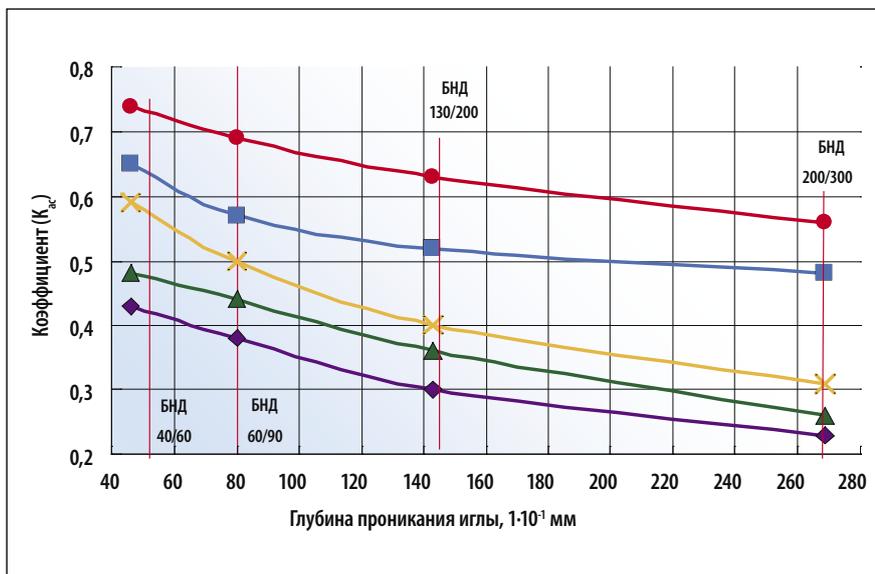
Испытания асфальтобетонов в условиях воздействия нагрузок и агрессивных сред вполне согласуются с приведенными выше результатами и представлениями. Типичные зависимости долговременной прочности приведены на рис. 2. Из них следует, что между напряжениями и временем жизни асфальтобетона во всех средах существует зависимость, близкая к степенной (2). Время жизни асфальтобетона существенно зависит от агрессивности среды. При этом порядок расположения зависимостей по долговечности остается таким же, как и зависимостей краевого угла смачивания или разных поверхностей, и сцепления с ними вяжущего. Такой характер зависимостей хорошо согласуется с результатами определения долговечности полиэтилена высокого давления в щелочной и кислотных средах. Согласно [24], наиболее агрессивной средой для него является щелочь, которая понижает долговечность по сравнению с испытаниями на воздухе в 2,4 раза, соляная кислота в 1,7 раза, вода в 1,3 раза.

Отличительной особенностью разрушения асфальтобетона в агрессивных средах от разрушения полиэтилена, который так же, как и битум, является химически инертным по отношению к воде, щелочи и кислоте, является зависимость агрессивности от уровня напряженного состояния. Это выражается в вырождении влияния сред по мере ускорения разрушения под увеличивающимися нагрузками.

Малые сроки жизни под механической нагрузкой не позволяют развиваться поверхностным явлениям в формирующихся трещинах и дефектах. Эти явления включают смачивание стенок трещин от устья до вершины, отслоение вяжущего от подложки, снижение прочности системы в вершине трещины за счет адсорбционных эф-

Таблица 3. Влияние агрессивных сред на долговечность асфальтобетонов разных типов при напряжении 1,0 МПа

Тип асфальтобетона	Водонасыщение, %	Прочность при 20 °С, МПа	Марка битума	Долговечность (с) и Ка.с. в различных агрессивных средах					
				Воздух	Дист. вода	5 % водн. р-р NaCl	2 % водн. р-р HCl	2 % водн. р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,05 % водн. р-р ОП-10
Б	2,9	8,3	БНД 40/60	10080	7952	6991	6466	5408	5034
				Ка.с.	0,79	0,69	0,64	0,54	0,50
В	2,6	6,0		17990	15016	13038	12096	10160	9098
				Ка.с.	0,83	0,72	0,67	0,56	0,51
Г	1,7	7,2		32444	27322	23737	22313	19247	16985
				Ка.с.	0,84	0,72	0,69	0,59	0,52



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента устойчивости в агрессивных средах ( $K_{ак}$ ) асфальтобетона типа «Б» на битумах марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 130/200 и БНД 200/300, при напряжении 0,50 МПа: ● – дистиллированная вода; ■ – 5 % водный раствор NaCl; × – 2 % водный раствор HCl; ▲ – 2 % водный раствор  $H_2SO_4$ ; ◆ – 0,05 % водный раствор ПАВ ОП-10

фактов, расклинивающий эффект вблизи вершин трещин.

Для оценки влияния структурных факторов на долговечность асфальтобетонных целесообразно использовать время жизни под одинаковой нагрузкой и коэффициент устойчивости в агрессивных средах  $K_{ак}$ , который представляет собой отношение времени жизни образца под нагрузкой в среде ( $t_c$ ) к времени жизни на воздухе ( $t_b$ ):  $K_{ак} = t_c / t_b$ .

Приведенные в табл. 3 данные для асфальтобетонных разных гранулометрических типов с оптимальным содержанием битума показывают, что время жизни до разделения сплошности на воздухе и в средах чувствительнее к изменению содержания щебня, чем нормируемая стандартами прочность. С переходом от асфальтобетона типа «Б» к типам «В» и «Г» оно возрастает соответственно на воздухе в 1,8 и в 3,2 раза, тогда как прочность при сжатии при 20 °С в этом случае изменяется не более чем в 1,2 раза. Коэффициент средоустойчивости при принятой схеме напряженного состояния также более чувствителен, чем нормируемый стандартом на 15-е сутки. Он растет по мере перехода от асфальтобетона типа «Б» к типам «В» и «Г» от 0,79 до 0,83 и 0,84 соответственно, тогда как значение стандартизованного коэффициента водостойкости для всех трех типов остается в пределах 0,86–0,87. Еще одной особенностью рассматриваемого испытания является то, что коэффициент водостойкости (как частный случай коэффициента устойчивости в агрессивной среде) может быть получен за 8 часов, вместо стандартных 15 суток.

Вода является самой щадящей жидкой агрессивной средой для асфальтобетона. В растворах NaCl,  $H_2SO_4$  и ОП-10 долговеч-

ность снижается соответственно в 1,47 и 1,59 раза. При этом  $K_{ак}$  понижается до недопустимо низкого уровня 0,5. Еще агрессивнее действуют среды при снижении уровня напряжения. При напряжении 0,5 МПа  $K_{ак}$  снижается от 0,74 в воде до 0,43 в растворе ОП-10. При этом время жизни возрастает: на воздухе в 46; в воде в 43; в NaCl в 43; в HCl в 42, в  $H_2SO_4$  в 41; в растворе ОП-10 в 40 раз.

**Таблица 4.** Характеристики разрушения асфальтобетона на битумах разных марок при напряжении 0,50 МПа и температуре 21 °С

Марки битумов	Глубина проникания иглы, при 25 °С, 1·10 <sup>-4</sup> м	Время до разрушения (с), $K_{ак}$ , константы В и в в различных агрессивных средах						
		Воздух	Дист. вода	5 % водн. р-р NaCl	2 % водн. р-р HCl	2 % водн. р-р $H_2SO_4$	0,05 % водн. р-р ОП-10	
БНД 40/60	46	4,6·10 <sup>5</sup>	3,7·10 <sup>5</sup>	3,5·10 <sup>5</sup>	3,2·10 <sup>5</sup>	2,8·10 <sup>5</sup>	2,6·10 <sup>5</sup>	
		$K_{ак}$	0,80	0,76	0,70	0,61	0,57	
		B	10187	7867	6926	6224	5911	5300
		b	-5,55	-5,40	-5,34	-5,29	-5,27	-5,23
БНД 60/90	80	2,3·10 <sup>5</sup>	1,6·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>5</sup>	1,2·10 <sup>5</sup>	1,1·10 <sup>5</sup>	1,0·10 <sup>5</sup>	
		$K_{ак}$	0,70	0,57	0,52	0,48	0,43	
		B	5103	3597	3220	2857	2534	2343
		b	-5,49	-5,38	-5,34	-5,29	-5,21	-5,14
БНД 130/200	143	6,4·10 <sup>4</sup>	4,0·10 <sup>4</sup>	3,3·10 <sup>4</sup>	2,6·10 <sup>4</sup>	2,5·10 <sup>4</sup>	1,9·10 <sup>4</sup>	
		$K_{ак}$	0,63	0,52	0,41	0,39	0,30	
		B	1396	934	798	670	631	481
		b	-5,47	-5,33	-5,27	-5,22	-5,14	-5,03
БНД 200/300	269	3,9·10 <sup>3</sup>	2,2·10 <sup>3</sup>	2,0·10 <sup>3</sup>	1,2·10 <sup>3</sup>	1,0·10 <sup>3</sup>	0,9·10 <sup>3</sup>	
		$K_{ак}$	0,56	0,51	0,31	0,26	0,23	
		B	95	63	52	42	40	32
		b	-5,43	-5,30	-5,16	-4,99	-4,93	-4,82

Близкий уровень снижения долговечности для разных сред свидетельствует об идентичности механизма действия всех принятых сред, обусловленного поверхностными явлениями. При этом максимальное время эксперимента достигает 127 часов, т.е. 5,3 суток, что практически в 3 раза короче стандартных испытаний.

**Снижение вязкости битумов — фактор ухудшения средоустойчивости асфальтобетона**

Показанная выше количественно способность битумов меньшей вязкости понижать адгезию к разным каменным материалам (табл. 2) непосредственно отражается на долговечности асфальтобетонных. При этом можно предположить определенный вклад в разрушение, наряду с отслаиванием пленки битума, проникания ее сквозь дефекты, формируемые на стадии перемешивания смесей, проницаемости некоторых сред (особенно кислот) сквозь пленку битума малой прочности.

Приведенные на рис. 6 зависимости коэффициента устойчивости в агрессивных средах асфальтобетонных на битумах разной пенетрации показывают, что во всех средах она существенно снижается с переходом от высоковязкого битума БНД 40/60 к маловязкому битуму БНД 200/300. Это снижение тем больше, чем агрессивнее среда. При напряжении 0,5 МПа она снижается: для битума с пенетрацией 46×0,1 мм от 0,80 в воде до 0,61

Таблица 5. Долговечность асфальтобетона типа «Б» с разным содержанием битума БНД 40/60 в агрессивных средах при температуре испытаний 21 °С

Содержание вяжущего, %	Водонасыщение, %	Время до разрушения (с) и Коэф. при напряжениях (МПа) в различных агрессивных средах											
		Воздух		Дис. вода		5 % водн. р-р NaCl		2 % водн. р-р HCl		2 % водн. р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		0,05 % водн. р-р ОП-10	
		0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00
4,0	6,7	2,7·10 <sup>5</sup>	5,8·10 <sup>3</sup>	1,8·10 <sup>5</sup>	4,1·10 <sup>3</sup>	1,1·10 <sup>5</sup>	2,9·10 <sup>3</sup>	0,8·10 <sup>5</sup>	2,2·10 <sup>3</sup>	0,7·10 <sup>5</sup>	1,9·10 <sup>3</sup>	0,6·10 <sup>5</sup>	1,6·10 <sup>3</sup>
		K <sub>а.с.</sub>		0,67	0,71	0,41	0,50	0,30	0,38	0,26	0,33	0,22	0,28
4,5	5,1	4,0·10 <sup>5</sup>	8,0·10 <sup>3</sup>	2,8·10 <sup>5</sup>	6,1·10 <sup>3</sup>	2,2·10 <sup>5</sup>	5,3·10 <sup>3</sup>	1,9·10 <sup>5</sup>	4,7·10 <sup>3</sup>	1,8·10 <sup>5</sup>	4,2·10 <sup>3</sup>	1,6·10 <sup>5</sup>	3,8·10 <sup>3</sup>
		K <sub>а.с.</sub>		0,70	0,76	0,55	0,66	0,48	0,59	0,45	0,52	0,40	0,48
5,0	2,9	4,6·10 <sup>5</sup>	10,0·10 <sup>3</sup>	3,4·10 <sup>5</sup>	8,0·10 <sup>3</sup>	3,0·10 <sup>5</sup>	7,0·10 <sup>3</sup>	2,7·10 <sup>5</sup>	6,4·10 <sup>3</sup>	2,2·10 <sup>5</sup>	5,4·10 <sup>3</sup>	2,0·10 <sup>5</sup>	5,0·10 <sup>3</sup>
		K <sub>а.с.</sub>		0,74	0,80	0,65	0,70	0,59	0,64	0,48	0,54	0,43	0,50

в растворе серной кислоты и 0,57 в растворе ПАВ; для битума с пенетрацией 80×0,1 мм от 0,7 в воде до 0,48 в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 0,43 в растворе ПАВ; для битума с пенетрацией 143×0,1 мм от 0,63 в воде до 0,39 в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 0,30 в растворе ПАВ; для битума с пенетрацией 269×0,1 мм от 0,56, в воде до 0,26 в растворе серной кислоты и 0,23 в растворе ПАВ. Агрессивность сред опасно возрастает с понижением вязкости битумов.

Разница значений коэффициентов устойчивости между водой и раствором ПАВ (табл. 4) в случае: битума БНД 40/60 — составляет 0,23, битума БНД 60/90 — составляет 0,27; битума 130/200—0,33; битума БНД 200/300—0,33. При переходе от битума 40/60 к битуму БНД 130/200 время жизни уменьшается: на воздухе в 7,2 раза; в воде в 9,2 раза; в растворе NaCl в 12,3 раза; в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в 11,2 раза; в растворе ОП-10 в 13,7 раза. Эти результаты свидетельствуют об огромном несоответствии реальных эксплуатационных возможностей различных по вязкости битумов с теми, что предусмотрены в действующих стандартах на асфальтобетоны. Нормируемые в украинском стандарте коэффициенты водостойчивости асфальтобетонов

на битумах с глубиной проникания иглы от 40–90 х 0,1 мм и с глубиной проникания иглы 90–200 х 0,1 мм отличаются всего на 0,05. В российском стандарте такая дифференция отсутствует. В ГОСТ 9128–97 даже для дорог I категории в первой дорожно-климатической зоне для асфальтобетонов I марки допускается применение битумов марки БНД 200/300.

При этом время жизни асфальтобетонов на битуме БНД 200/300 на воздухе в 117 раз, а в воде в 160 раз ниже, чем асфальтобетона на битуме БНД 40/60, а коэффициент водостойчивости соответственно равен 0,80 и 0,56.

Приведенные данные относятся к асфальтобетонам с таким содержанием каждого битума, которое обеспечивало близкие значения водонасыщения от 2,9 до 3,2%, значения коэффициентов длительной водостойчивости составляли для асфальтобетонов на битуме: БНД 200/300—0,82, БНД 130/200—0,83, БНД 60/90—0,85, БНД 40/60—0,86, а показатели прочности при 20 °С соответственно: 4,9; 5,5; 6,6 и 8,3 МПа. Оказывается, стандартные показатели крайне нечувствительны к изменению марок битумов в асфальтобетоне.

### Увеличение содержания битума и средостойчивость

Прочность и водонасыщение асфальтобетона существенно зависят от содержания в нем битума (табл. 5). Оптимальное содержание битума, обеспечивающее максимальную прочность, достигается сочетанием степени структурированности пленки битума и объемом остаточных пор. Водонасыщение определяется степенью закопления остаточных пор, а водостойчивость, кроме того, уровнем сплошности битумной пленки на поверхности каменных материалов.

Долговечность асфальтобетонов с ростом содержания битума возрастает подобно тому, как и прочность, хотя и более интенсивно (в 1,78 против 1,27), коэффициент стойкости в средах также более чувствителен к содержанию битума. При изменении содержания битума от 4,0 до 5,0 (соответственно водонасыщения от 6,7 до 2,9%) коэффициент увеличивается от 0,71 до 0,8 против 0,83 и 0,86 по стандартному методу. Эта разница нарастает с повышением агрессивности сред на: 0,09 в воде, 0,2 в растворе NaCl; 0,26 в растворе HCl; 0,21 в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 0,22 в растворе ОП-10. При этом ухудшение устойчивости в среде происходит более активно для асфальтобетона с большим водонасыщением. Так, с переходом от водной среды к раствору HCl K<sub>а.с.</sub> асфальтобетона с водонасыщением, равным 6,7%, уменьшается на 0,33, а асфальтобетона с водонасыщением 2,9% — лишь 0,16. Максимальное уменьшение K<sub>а.с.</sub> по сравнению с водой отвечает раствору ОП-10: 0,43 для асфальтобетона с водонасыщением 6,7% и 0,3 для асфальтобетона с водонасыщением 2,9%. Таким образом, среды наиболее опасны для пористых асфальтобетонов.

### Повышение уплотняющей нагрузки и ее вклад в средостойчивость и долговечность асфальтобетона

Такой же характер изменения K<sub>а.с.</sub> наблюдается и в случае асфальтобетонов с одинаковым содержанием битума, но разным во-

Таблица 6. Показатели средостойчивости асфальтобетона типа «Б», уплотненного при 10 МПа и 30 МПа (температура испытаний 21 °С)

Битум	Режим уплотнения, МПа	Кв15	Время до разрушения асфальтобетона (с) при напряжениях (МПа) в различных агрессивных средах											
			Воздух		Дис. вода		5 % водн. р-р NaCl		2 % водн. р-р HCl		2 % водн. р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		0,05 % водн. р-р ОП-10	
			0,50	1,0	0,50	1,0	0,50	1,0	0,50	1,0	0,50	1,0	0,50	1,0
БНД 200/300	3,5	10	1,6·10 <sup>3</sup>	37	1,2·10 <sup>3</sup>	29	1,0·10 <sup>3</sup>	24	0,7·10 <sup>3</sup>	17	0,7·10 <sup>3</sup>	16	0,6·10 <sup>3</sup>	14
		K <sub>а.с.</sub>		0,76	0,78	0,61	0,65	0,45	0,46	0,42	0,43	0,35	0,38	
	30	0,82	3,9·10 <sup>3</sup>	82	2,3·10 <sup>3</sup>	52	2,1·10 <sup>3</sup>	49	1,2·10 <sup>3</sup>	28	1,1·10 <sup>3</sup>	26	0,9·10 <sup>3</sup>	20
		K <sub>а.с.</sub>		0,58	0,63	0,53	0,60	0,30	0,34	0,27	0,32	0,23	0,24	
БНД 40/60	5,0	10	9,8·10 <sup>3</sup>	214	7,1·10 <sup>3</sup>	159	6,0·10 <sup>3</sup>	138	4,0·10 <sup>3</sup>	91	4,0·10 <sup>3</sup>	90	3,2·10 <sup>3</sup>	67
		K <sub>а.с.</sub>		0,72	0,76	0,61	0,64	0,41	0,43	0,41	0,42	0,32	0,31	
	30	0,86	459·10 <sup>3</sup>	10·10 <sup>3</sup>	373·10 <sup>3</sup>	8·10 <sup>3</sup>	350·10 <sup>3</sup>	7·10 <sup>3</sup>	317·10 <sup>3</sup>	6·10 <sup>3</sup>	279·10 <sup>3</sup>	6·10 <sup>3</sup>	258·10 <sup>3</sup>	5·10 <sup>3</sup>
		K <sub>а.с.</sub>		0,81	0,79	0,76	0,69	0,69	0,64	0,61	0,59	0,56	0,52	

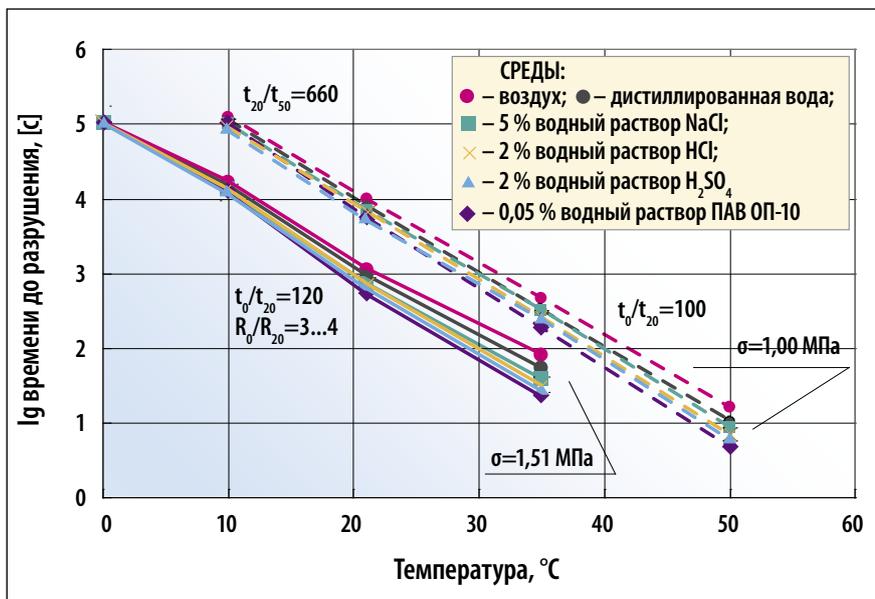


Рис. 7. Зависимость времени до разрушения асфальтобетона типа «Б» с 5,0 % на битуме БНД 40/60 от температуры среды

донасыщением, обусловленным величиной уплотняющего давления (табл. 6). Асфальтобетон с 5% битума БНД 40/60 и водонасыщением 2,9%, полученный под давлением 30 МПа, характеризуется большими значениями  $K_{ac}$  во всех средах, чем такой же асфальтобетон, уплотненный давлением 10 МПа, с водонасыщением 6,6%. При этом, однако, разница коэффициентов  $K_{ac}$  для двух асфальтобетонов, уплотненных разным да-

лением, существенно ниже, чем асфальтобетонов с такой же разницей водонасыщения, но достигнутой при давлении одном давлении 30 МПа за счет меньшего содержания битума, что может быть связано с меньшей толщиной пленки, ее большей средопроницаемостью. Недоуплотнение резко снижает прочность асфальтобетона (от 8,33 МПа до 4,72 МПа при 20 °C). Это приводит к уменьшению долговечности

на воздухе в 47 раз, в воде в 50 раз, в растворе NaCl в 51 раз, в растворе HCl в 70 раз, в растворе  $H_2SO_4$  в 60 раз, в растворе ПАВ в 75 раз. Такое снижение долговечности снижает эффект действия среды, так как за короткие промежутки времени она не успевает за развитием трещин и не достигает их вершин.

В связи с этим возникает проблема выбора нагрузок, которыми необходимо воздействовать на асфальтобетоны разных типов и прочности. Вопрос заключается в том, должна ли эта нагрузка быть долей прочности, установленной при стандартном испытании, либо это должна быть нагрузка, соответствующая тем, что действуют на покрытия от транспортных средств на дорогах различных категорий. Уменьшая нагрузку, можно увеличить время жизни асфальтобетона и обеспечить больше чувствительность  $K_{ac}$  к среде.

**Замедляющее действие понижения температуры на разрушение асфальтобетона в агрессивных средах**

В этом отношении характерны результаты определения долговечности и  $K_{ac}$  при различных температурах. С переходом от температуры 20 °C к 0 °C прочность асфальтобетона увеличивается в пределах 1,5–1,6 раз. С учетом степенной зависимости долговечности от напряжения это приводит к огромному ее изменению. Следовательно, как и в случае с уплотнением, одинаковая нагрузка для всех температур изменяет соотношение скорости смачивания средой

Таблица 7 Показатели средоустойчивости асфальтобетона типа «Б» с 5,0 % битума БНД 40/60

Температура испытаний, °C	Время до разрушения асфальтобетона (с), $K_{ac}$ , константы В и b в различных агрессивных средах при напряжении 1,51 МПа						
	Воздух	Дист. вода	5% водн. р-р NaCl	2% водн. р-р HCl	2% водн. р-р $H_2SO_4$	0,05% водн. р-р ОП-10	
35	81	54	39	32	28	24	
	$K_{ac}$	0,67	0,48	0,40	0,35	0,30	
	B	709	510	500	409	379	314
	b	-4,27	-4,26	-4,25	-4,23	-4,15	-4,12
21	1147	883	728	695	678	597	
	$K_{ac}$	0,77	0,63	0,61	0,59	0,52	
	B	10187	7867	6926	6224	5911	5300
	b	-5,55	-5,40	-5,34	-5,29	-5,27	-5,23
10	16601	13682	13355	12346	12040	11094	
	$K_{ac}$	0,82	0,80	0,74	0,73	0,67	
	B	$1,59 \cdot 10^5$	$1,22 \cdot 10^5$	$1,18 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^5$
	b	-5,50	-5,48	-5,46	-5,44	-5,42	-5,39
0	138012	137954	137932	137891	137877	137671	
	$K_{ac}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
	B	$1,83 \cdot 10^6$	$1,72 \cdot 10^6$	$1,67 \cdot 10^6$	$1,64 \cdot 10^6$	$1,59 \cdot 10^6$	$1,46 \cdot 10^6$
	b	-5,55	-5,54	-5,54	-5,55	-5,54	-5,53

**Таблица 8** Зависимость напряжений, обеспечивающих близкие значения  $K_{ac}$  в средах, от марки используемых в асфальтобетонах битумов

Марки битумов	Напря- жение, МПа	Время до разрушения в различных агрессивных средах, с					
		Воздух	Дис. вода	5 % водн. р-р NaCl	2 % водн. р-р HCl	2 % водн. р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,05 % водн. р-р ОП-10
БНД 40/60	0,50	13362	9611	9350	7302	7073	5661
		$K_{ac}$	0,72	0,70	0,55	0,53	0,42
БНД 60/90	0,38	13081	9398	9142	7443	6920	5604
		$K_{ac}$	0,72	0,70	0,57	0,53	0,43
БНД 130/200	0,19	9786	7037	6841	5562	5173	4189
		$K_{ac}$	0,72	0,70	0,57	0,53	0,43
БНД 200/300	0,09	5052	3611	3527	2863	2675	2147
		$K_{ac}$	0,71	0,70	0,57	0,53	0,42

дефектов асфальтобетона и скорости развития трещин. Принятые в эксперименте нагрузки, вызывающие в образцах напряжение 1,0 МПа и 1,5 МПа, позволили обнаружить следующее (табл. 7 и рис. 7).

С переходом температуры от 50 к 0 °С агрессивное действие всех сред не только снижается, но при 0 °С не проявляется вообще. Можно предположить, что одной из причин этого является рост поверхностного натяжения самих сред, снижающий их смачивающую способность. Но, вероятно, в большей мере это связано с таким усилением адгезионных связей и когезии битума, при которых роль вытесняющего действия воды существенно уменьшается. Поскольку действие всех сред вырождается при 0 °С, то причиной может быть агрегатное состояние воды. При высоких температурах активность проявляется наиболее рельефно. Как и во всех предыдущих случаях, распределение сред по агрессивности сохраняется и совпадает с порядком их распределения по поверхностному натяжению, смачиванию и сцеплению битума с подложками. Сопоставление времен до разрушения при разных температурах показывает, что их отношение на воздухе при температурах 20 °С и 50 °С приближается к 660, а при температурах 0 °С и 20 °С находится в пределах 100–120 раз. Для самой агрессивной среды (раствора ПАВ) соотношение времени жизни при 0 °С и 20 °С равно 230. В то же время соотношение пределов прочности на сжатие при 20 °С и 50 °С обычно находится в пределах 2–3. Это еще раз свидетельствует о том, что время является наиболее чувствительной характеристикой кинетических процессов разрушения. Факт снижения водоустойчивости с повышением температуры впервые был обнаружен при исследовании долговечности асфальтобетонных, работающих в условиях Бангладеш, где огромное количество осадков (около 4500 мм в год) и высокие летние температуры [25]. В [25] была показана зависимость коэффициентов водоустойчивости от температуры и величины действующего

напряжения, а также обнаружено аномальное поведение асфальтобетонных на битуме с добавкой анионоактивной ПАВ в водной среде при температурах 20 и 50 °С.

#### **Проблемы выбора нагрузок, при которых максимально проявляется действие агрессивных сред**

Для объективной оценки влияния агрессивной среды на долговечность асфальтобетона необходимо, чтобы процесс разрушения был продолжительным. Это согласуется с условиями работы асфальтобетона в покрытиях, когда действующая нагрузка вызывает напряжение существенно меньше предельных. Эта продолжительность может быть задана нормированным значением коэффициентов устойчивости в агрессивной среде, в качестве которой может быть принята вода. Последствия нормирования одинакового  $K_{ac}$  для асфальтобетонных на битумах разной вязкости могут быть проиллюстрированы данными табл. 8, которые приведены к температуре 35 °С. Они показывают, что для достижения одного и того же значения  $K_{ac}$ , равного 0,72 в водной среде, задаваемые напряжения должны снижаться по мере перехода от высоковязкого битума к маловязкому почти в 10 раз. Это означает, что несущая способность асфальтобетона на битуме БНД 200/300 намного ниже любой реально действующей на дороге нагрузки. Это стало одной из причин исключения из государственного стандарта Украины битума этой марки БНД 200/300.

При нагрузках, обеспечивающих равное значение  $K_{ac}$  асфальтобетонных на разных битумах, их долговечность понижается с ростом пенетрации битумов, но во много раз меньше, чем в случае одинаковой для всех асфальтобетонных на разных битумах нагрузки. В то же время значения  $K_{ac}$ , снижаясь по мере перехода от менее к более агрессивной среде, тем не менее остаются практически близкими для всех битумов: в воде 0,71–0,72; в растворе NaCl — 0,7; в рас-

творе HCl 0,55–0,57; в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–0,53; в растворе ОП-10–0,42–0,43.

При таком подходе можно объективно оценивать прочность, долговечность и устойчивость асфальтобетонных в агрессивных средах. Время, необходимое для определения  $K_{ac}$ , в этом случае не превышает 4 часа, в отличие от нормируемых стандартом 15 суток.

Все рассмотренные здесь факторы приводят к получению степенных зависимостей долговременной прочности. Эта зависимость включает два коэффициента; коэффициент «В» связан с абсолютным значением долговечности в разных средах, а второй коэффициент «b» учитывает степень влияния среды на изменение долговечности при разных напряжениях. Приведенные в табл. 4 и 7 значения коэффициентов уравнения (2) позволяют определить долговечность асфальтобетонных при различных напряжениях. Особенностью этих коэффициентов является то, что коэффициент «В» является чувствительным к любым изменениям состава, тогда как изменение коэффициента «b» относительно слабо влияет на долговечность. Его значение мало зависит от степени структурированности битума порошком, его структурного типа, от вида среды, но существенно зависит от температуры испытания.

#### **Заключение**

Время жизни асфальтобетона является показателем, исключительно чувствительным к действию внешних факторов, температуры, механических нагрузок, жидких рабочих сред и особенностей его состава, структуры, содержания, марки битума, а также его пористости. Это время можно интерпретировать как показатель статистической выносливости, или долговечности, асфальтобетона.

В исследуемом в работе диапазоне температур и времен действия нагрузок ВЖ подчиняется степенной зависимости, в отличие от экспоненциальной зависимости экспериментально и теоретически обоснованной для твердых тел в работах школы С. Н. Журкова. Это в решающей степени обусловлено структурными изменениями в асфальтовых системах, сопровождающих процесс их деформирования и разрушения.

Жидкие рабочие среды не приводят к принципиальному изменению механизма разрушения, но способствуют к резкому уменьшению значений постоянных уравнений (2). При этом влияние сред на значение коэффициента «В» существенно больше, чем на показатель степени «b».

В пределах принятых диапазонов исследований по напряжениям и температурам в воздушной среде и в агрессивных средах механизм разрушения может интерпретироваться как межмолекулярный, что подтверждается практически равными значениями энергии активации процесса разру-

шения и вязкого течения асфальтобетона на участке постоянной скорости течения при испытаниях на ползучесть. Влияние среды приводит к уменьшению энергии активации процесса разрушения.

Физическим свидетельством в пользу такого механизма разрушения асфальтобетонов служит устойчивая связь времени жизни асфальтобетонов под нагрузкой в средах с краевым углом смачивания средами различных подложек и сцеплением битумной пленки с подложкой в этих средах. Чем меньше краевой угол смачивания средой подложки, тем меньше сцепление с подложкой битума, тем меньше ВЖ асфальтобетона под нагрузкой. По степени возрастания агрессивного воздействия среды располагаются в таком порядке: вода, водные растворы соли, соляной, серной кислот, поверхностно-активного вещества. При этом растворы поверхностно-активного вещества, не оказывающие никакого химического воздействия на контактную зону битум — поверхность каменного материала, приводят к самому быстрому разрушению асфальтобетона под нагрузкой.

Результаты исследований статистической усталости позволяют определить несколько принципиально значимых показателей: время до разрушения на воздухе и в среде; коэффициент устойчивости в средах; постоянные степенного уравнения для расчета статической выносливости долговечности.

Влияние среды на выносливость тем больше, чем лучше она смачивает компоненты асфальтобетона, чем больше его пористость (средонасыщение), чем меньше вязкость битума, чем меньше содержание битума, чем больше дробимость минеральных зерен при уплотнении; чем выше температура. Оно проявляется тем в большей степени, чем меньше величина напряжений, вызванных в асфальтобетоне приложенной нагрузкой и соответственно, чем меньше скорость развития трещин. При этом асфальтобетон может разрушаться только за счет действия среды в отсутствие механического воздействия при длительном средопоглощении или разрушаться за счет действия больших нагрузок без практического вклада в разрушение среды, которая за короткий промежуток времени не успевает проникать в тело асфальтобетона, смачивать его внутренние поверхности, достигать вершин трещин. В промежутках между этими двумя крайними случаями разрушающее действие среды определяется соотношением скорости разрушения и скоростью смачивания средой внутренних поверхностей асфальтобетона, прониканием среды сквозь сплошную пленку битума на поверхности каменных материалов или сквозь технологические дефекты пленок.

В связи с этим при разработке метода оценки средоустойчивости возникает необходимость установления уровня напряженного состояния, который обеспечивал бы, с одной стороны, полноценное участие сре-

ды в процессе разрушения, а с другой — минимальное возможное время испытания, при котором значение коэффициента средоустойчивости приближалось бы к принятому для водоустойчивости значению (0,7–0,8). Этот уровень напряженного состояния, по аналогии с его назначением при определении расчетных значений модулей упругости, может соответствовать 0,15–0,3 от прочности асфальтобетона на чистый изгиб. При этом время определения коэффициента средоустойчивости может сократиться в 15–20 раз по сравнению с временем, нормируемым для определения коэффициента длительной водоустойчивости асфальтобетонов действующими стандартами.

### Литература

1. Рейнер М. Деформации и течение. Введение в реологию. — М.: Гостоптехиздат. — 1963. — 381 с.
2. Филиппов В. Релаксация в растворах полимеров, полимерных жидкостях и гелях // В кн. Свойства полимеров и нелинейная акустика (Под ред. У. Мэзона.). М.: Мир. 1969. — С. 7–109.
3. Иванов Н. Н., Телегин М. Я., К обоснованию показателей механических свойств асфальтовых смесей // Труды ДорНИИ «Исследование органических вяжущих материалов и физико-механических свойств асфальтовых систем». — 1949. С. 106–133.
4. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
5. Радовский Б. С. Современное состояние разработки американского метода проектирования асфальтобетонных смесей Суперпейв // Дорожная индустрия. — 2008. С. 12–22.
6. Горелышев Н. В., Пантелеев Ф. Н. О пластичности дорожного асфальтового бетона // Труды МАДИ. Вып. 15. — 1953. — С. 138–152.
7. Бартенев Г. М., Зуев Ю. С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. М.: Химия, 1964. — 387 с.
8. Золотарев В. А., Садовенко Д. И. Влияние температуры и времени на прочность асфальтобетона // Сборник трудов Хабаровского политехнического института. — Вып. 19, 1969. С. 46–52.
9. Золотарев В. А. Исследование процессов деформирования и разрушения асфальтобетона // Материалы V Всесоюзного научно-технического совещания по основным проблемам технического прогресса в дорожном строительстве. Сб. 41 (1). — М.: СоюздорНИИ. 1971. С. 121–125.
10. Гоглидзе Л. М. К вопросу изучения реологических свойств битумов и асфальтовых систем // Труды МАДИ, вып. 16, 1955. С. 24–32.
11. Золотарев В. А., Титарь В. С. О долговременной прочности асфальтобетона в широком диапазоне температур // Известия ВУЗ'ов, серия «Строительство и архитектура». — № 11, — 1981. С. 83–87.

12. О применимости кинетической теории прочности твердых тел при исследовании долговечности асфальтобетона в условиях низких температур // Повышение эффективности применения цементных и асфальтовых бетонов в Сибири. Межвузовский сборник. — Омск. — 1979. — С. 3–9.

13. Никольский Ю. Е., Писклин В. Н., Шестаков В. Н. О долговременной прочности асфальтобетона в диапазоне температур от 223 до 273 К // Повышение эффективности применения цементных и асфальтовых бетонов в Сибири. Межвузовский сборник. — Омск. — 1979. — С. 10–17.

14. Носков В. Н., Таращанский Е. Г. К вопросу о долговременной прочности асфальтобетона // Повышение эффективности применения цементных бетонов в Сибири. Межвузовский сборник. Вып. 3. — Омск. — 1979. — С. 15.

15. Стабников Н. В., Кочерова В. И. О деформативной способности и долговечности гидротехнического асфальтобетона // Известия ВНИ института гидротехники. Т. 113. 1976. — С. 47–51.

16. Стабников Н. В. О расчете долговечности и деформативной способности полимербитумных материалов // Известия ВНИ института гидротехники. Т. 128. 1979. — С. 8–14.

17. Бабков В. Ф. Развитие техники дорожного строительства. — М.: Транспорт. 1988. — 272 с.

18. Mauduit V., Mauduit C., Vukiano-Greullet N., Coulon N. Degradations precoces des couches de routement bitumineuses a la sortie des hivers // Revue generale des routes. — № 859. — 2007. — P. 99–104.

19. Ефремов С. В. Долговечность асфальтобетона в условиях воздействия агрессивных сред // Дисс. канд. техн. наук. — ХНАДУ. — Харьков. — 2010. — 187 с.

20. Золотарев В. А., Зубко З. Г., Космин А. В., Пархоменко Ю. Г., Мищенко Г. М. Разрушение асфальтовых материалов под воздействием механических нагрузок и агрессивных сред // Реферативный сборник «Межотраслевые вопросы строительства (отечественный опыт)». — М.: ЦИНИС. — Вып. 3. — 1970. — С. 92–94.

21. Дорожный асфальтобетон // Л. Б. Гезенцевей, Н. В. Горелышев, А. М. Богуславский, И. В. Королев. Под ред. Л. Б. Гезенцевей. — М.: Транспорт, 1985. — 350 с.

22. Лысихина А. И. Влияние молекулярно-поверхностных свойств битумов, дегтей и минеральных материалов на свойства асфальтовых смесей // Труды ДОРНИИ. — Вып. 8. — 1949. С. 6–37.

23. Колбановская А. С., Михайлов В. В. Дорожные битумы. — М.: Транспорт — 1973. — 264 с.

24. Бокшицкий М. Н., Клинов И. Я., Бокшицкая Н. А. Статическая усталость полиэтилена. — М: Машиностроение. — 1967. — 221 с.

25. Золотарев В. А., Камруззаман Мд. Оценка водоустойчивости асфальтобетона по результатам статической усталости // Исследование цементных бетонов и пластбетонов. Сборник научных трудов. Омск. — 1988. С. 3–9.