

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Существует множество испытаний по определению свойств асфальтобетона. К примеру, ГОСТ Р 58406.3 позволяет с уверенностью оценивать стойкость асфальтобетона к колееобразованию, методика испытания имитирует процесс образования колеи в реальных условиях. В нашем регионе мы предпочитаем проводить испытание на колею в воде с металлическим колесом, что позволяет определять одновременно и колееустойчивость, и адгезионную стойкость (устойчивость к воздействию воды).

Д. А. Колесник, руководитель группы исследования строительных материалов АО «ВАД»

Много вопросов остается к определению низкотемпературной трещиностойкости. У нас есть стандарт на испытание балочек асфальтобетона на изгиб ГОСТ Р 58406.6, который по большому счету повторяет метод испытания по ГОСТ 12801. Практика показывает, что при испытании по этой методике результаты имеют низкую взаимосвязь со свойствами битума и могут противоречить логике. Даже если сравнить требования к асфальтобетону по ГОСТ Р 58406.2 и к щебеночно-мастичному асфальтобетону по ГОСТ Р 58406.1, то они отличаются только по показателю «предельная прочность при изгибе» всего на 7%. Мы неоднократно проводили испытания, для того чтобы понять, как влияют вяжущие на эти показатели; к сожалению, мы не увидели отличия между

асфальтобетоном на чистом битуме и ПБВ на основе СБС, на вяжущем PG 76–22 и PG 70–34, между ЩМА и обычным асфальтобетоном. Коллеги из других организаций подтверждают информацию своими исследованиями (таблица 1). Кроме того, в стандарте на объемно-функциональный метод проектирования асфальтобетона ГОСТ Р 58401.1 не предусматривается испытание асфальтобетона на низкотемпературную трещиностойкость, считается, что она обеспечивается за счет битумного вяжущего. Определяя нижнюю границу PG, мы обеспечиваем низкотемпературную трещиностойкость, поскольку она практически полностью зависит от свойств битумного вяжущего. Это действительно так, можно сказать, что примерно 70% — это работа вяжущего, но есть еще много факторов, которые

существенно влияют на низкотемпературную трещиностойкость, — например, содержание битумного вяжущего, его старение на технологическом этапе, толщина битумной пленки, адгезия, содержание воздушных пустот, прочность каменного материала, вид и тип асфальтобетона и т.д. Факторов много, поэтому нам действительно необходим метод испытания асфальтобетона на низкотемпературную трещиностойкость, чтобы подтвердить и обеспечивать необходимые свойства. В последнее время появилось большое количество модификаторов для асфальтобетона, которые работают по принципу сухого ввода, т.е. их вводят непосредственно в смеситель асфальтобетонного завода при производстве. Есть определенные трудности при проверке влияния таких модификаторов на битумные

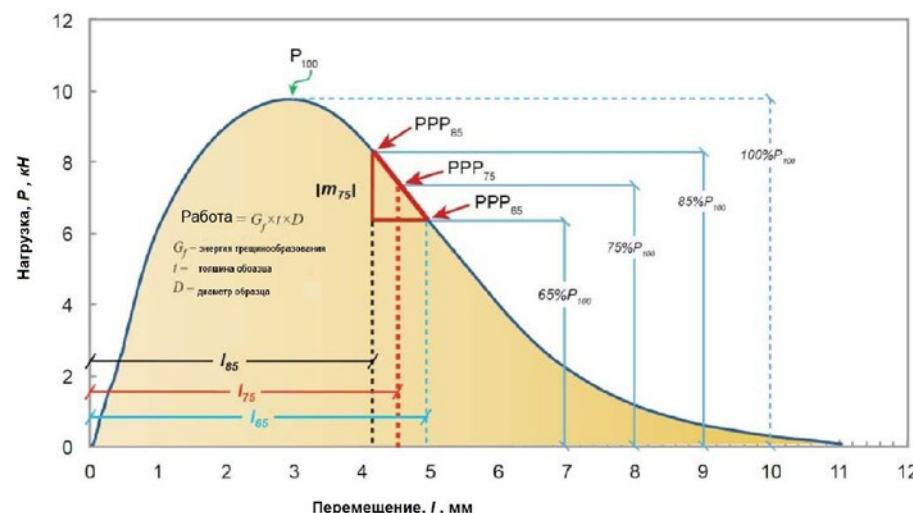
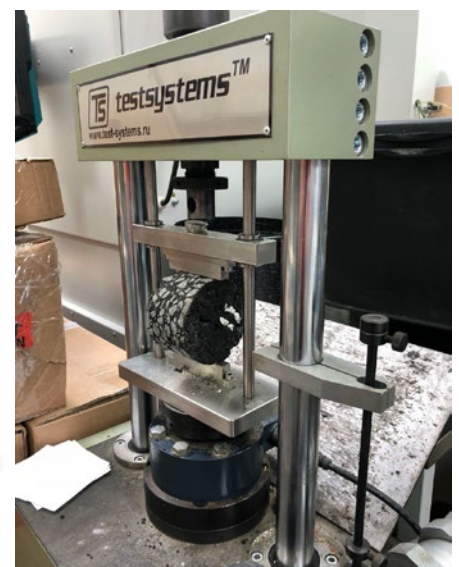


Рисунок 1. Схема расчета индекса трещиностойкости (CTindex), справа — оборудование для испытания



тема номера

Таблица 1. Сводная таблица определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения (данные исследования ООО «СК „Орион Плюс“»)

Наименование а/б смеси	Горная порода каменного материала	Вязущее	Содержание воздушных пустот (Pa),%	Предел прочности на растяжение при изгибе (Ризг), МПа	Предельная относительная деформация растяжения (Епр), см	Требования ГОСТ Р
К/з пористая М-I	гранит	БНД 70/100	6,0	6,7	0,0122	не менее 5,5 не менее 0,0040
			7,0	6,7	0,0122	
К/з плотная тип Б М-I	гранит	БНД 70/100	4,2	9,0	0,0103	не менее 6,5 не менее 0,0045
A22От	гранит	БНД 70/100	5,8	7,3	0,0049	не менее 5,5 не менее 0,0040
A22Нг	гранит	БНД 70/100	4,4	10,8	0,0032	не менее 6,5 не менее 0,0045
			2,8	8,2	0,0039	
	габбро-диабаз	4,0	10,5	0,0041		
		кварцито-песчаник	4,4	9,0		0,0050
A16Нг	гранит	БНД 70/100	4,1	8,1	0,0056	не менее 6,5 не менее 0,0045
	габбро-диабаз		4,5	11,5	0,0038	
A16Вт	габбро-диабаз	БНД 70/100	2,6	10,6	0,0035	не менее 7,0 не менее 0,0050
			2,7	11,0	0,0060	
A11Нн	габбро-диабаз	БНД 70/100	3,4	13,7	0,0024	не менее 6,0 не менее 0,0040
			4,6	10,1	0,0011	
A11Вн	гранит	БНД 70/100	3,3	9,0	0,0016	не менее 6,5 не менее 0,0050
			5,6	8,1	0,0026	
	габбро-диабаз	4,3	8,7	0,0049		
		4,1	6,4	0,0033		
		2,7	15,6	0,0025		
A8Вл	гранит	БНД 70/100	2,1	9,3	0,0027	не менее 5,5 не менее 0,0040
	габбро-диабаз		2,0	12,7	0,0013	
A5Вл	гранит	БНД 70/100	2,9	10,3	0,0014	не менее 5,5 не менее 0,0040
ЩМА-22	габбро-диабаз	ПБВ 60	3,1	11,8	0,0050	не менее 7,5 не менее 0,0050
			3,5	10,4	0,0045	
			3,8	9,3	0,0037	
ЩМА-16	габбро-диабаз	ПБВ 60	2,4	10,7	0,0126	не менее 7,5 не менее 0,0050
			3,1	10,3	0,0043	
			4,2	11,1	0,0040	
			5,0	12,3	0,0052	
			5,1	11,2	0,0083	
			6,7	9,7	0,0038	
ЩМА-11	габбро-диабаз	ПБВ 60	4,3	14,9	0,0035	не менее 7,5 не менее 0,0050
SP-16Т	гранит	PG 70-28	5,2	7,5	0,0028	—
			4,9	8,6	0,0042	
SMA-16	габбро-диабаз	PG 76-28	3,1	10,2	0,0082	—
			3,8	9,6	0,0042	
			4,2	12,1	0,0044	
			5,0	8,9	0,0045	

вяжущие. Это можно сделать, но в итоге все равно требуется проверка асфальтобетона, которая подтвердит его эксплуатационные свойства как при низкой, так и при высокой температуре. Колееустойчивость мы можем определить, но применение таких модификаторов упирается в обеспечение низкотемпературных свойств. Таким образом, на сегодня не решен вопрос определения низкотемпературной трещиностойкости асфальтобетона. Необходим простой и чувствительный метод, который будет показывать взаимосвязь свойств битумного вяжущего и асфальтобетона.

Мы провели анализ литературы, использовали свой опыт работы с асфальтобетонном по определению устойчивости к трещинообразованию [1, 2]. В результате пришли к выводу, что самым простым, надежным и чувствительным испытанием сейчас является определение трещиностойкости через прочность при непрямом растяжении. Аналогичная методика используется в США при определении индекса трещиностойкости STindex при положительных температурах 20–25 °С и учитывает энергию разрушения (площадь под кривой нагрузка-деформация), пост-пик наклон и величину вертикальной деформации (рисунок 1, формула 1, 2). Более подробно об этом индексе можно прочитать в статье [1].

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{P} \times \left(\frac{l}{D}\right) \quad (1)$$

где — энергия разрушения  $G_f$  — работа разрушения (площадь под кривой от нагрузки и вертикального перемещения), отнесенная к площади поверхности растрескивания (рисунок 1); вне зависимости от нагрузки и деформации асфальтобетон с большой энергией разрушения будет обладать лучшей трещиностойкостью; отношение нагрузки к деформации  $P/l$  является параметром «модуля» (или наклоном кривой нагрузка-перемещение); более жесткие смеси с высокой прочностью и малым перемещением обладают худшей стойкостью к образованию трещин;

отношение деформации к диаметру  $l/D$  — является параметром устойчивости к «деформации» (или деформационной устойчивостью под нагрузкой); чем больше  $l$  (деформация) тем выше устойчивость к образованию трещин.

В итоге в США для оценки трещиностойкости предлагается и используется следующий индекс (формула 2, ASTM D8225):

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left(\frac{l_{75}}{D}\right) \quad (2)$$

где —

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right|$$

Рассмотрев эту методику достаточно подробно, мы пришли к выводу, что STindex зависит в основном и в большей степени от энергии разрушения и чуть в меньшей степени — от прочности асфальтобетона, а энергия разрушения уже учитывает в себе величину перемещения (деформацию) образца.

Взяв за основу метод непрямого растяжения ГОСТ Р 58401.18, мы решили провести разработку метода испытания на трещиностойкость при отрицательной температуре минус 18 градусов с оценкой по энергии разрушения как наиболее чувствительному элементу индекса трещиностойкости — STindex.

На первоначальном этапе были определены условия испытания, т.к. скорость нагружения образца на прессе должна быть оптимальной, время испытания должно быть минимальным, чтобы образец не успел нагреться от окружающей среды. При этом скорость нагружения должна быть как можно медленнее, чтобы получить больше информации без абсолютно хрупкого разрушения, избежать удара. Стандартно скорость нагружения при испытании на не прямое растяжение составляет 50 мм/мин., но эта скорость хорошо подходит только для положительных температур, при отрицательных температурах асфальтобетон имеет высокую жесткость и нагружается очень

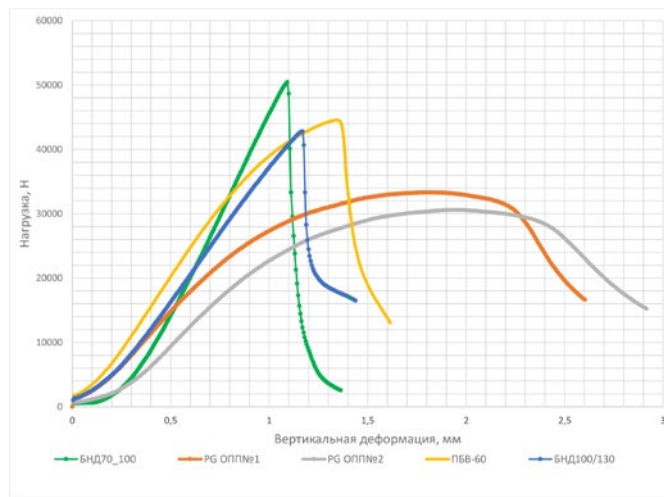


Рисунок 2. График зависимости нагрузки от вертикальной деформации (вяжущие предоставлены «Газпромнефть - Битумные материалы»)

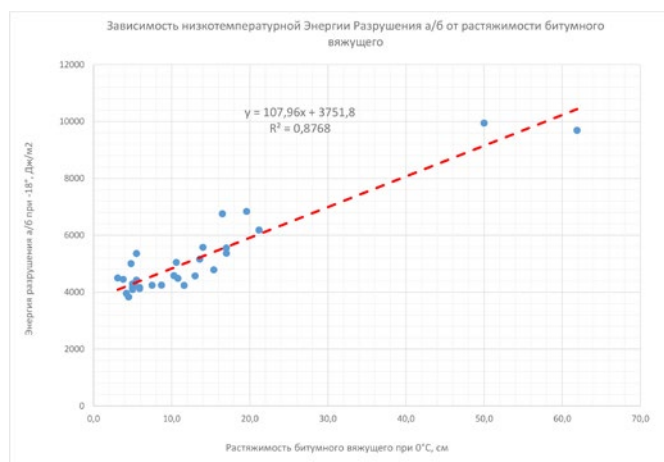


Рисунок 3. График зависимости энергии разрушения асфальтобетона при минус 18°C от растяжимости вяжущего при 0°C

Таблица 2. Средние значения коэффициента вариации данных проведенного эксперимента

Наименование	Прочность при непрямом растяжении	Энергия деформации до максимального пика нагрузки	Энергия разрушения (трещинообразования) до разрушения, до 50% пост-пик нагрузки	Деформация до максимального пика нагрузки	Деформация до разрушения, до 50% пост-пик нагрузки
Среднее значение коэффициента вариации данных, COV, %	5,26	8,00	6,67	9,76	8,38
Изменение COV, % или повышение точности	-	16,1		14,1	

быстро, фактически при такой скорости происходит механический удар, которого практически не может быть в природе, что приводит к получению некорректного результата. К тому же, существующее оборудование не всегда способно адекватно записать всю поступающую информацию при таких высоких скоростях нагружения. В итоге после проведения серии экспериментов с образцами из разных асфальтобетонных смесей мы пришли к выводу, что оптимальной является скорость нагружения в 3 мм/мин. Аналогичная скорость используется при испытании асфальтобетона на прочность в ГОСТ 12801. Следующей задачей было определение взаимосвязи между свойствами битума и энергией разрушения при непрямом растяжении при минус 18 градусах. Чтобы минимизировать влияние зернового состава, была выбрана песчаная асфальтобетонная смесь с содержанием битумного вяжущего 6,5% на основе песка из отсева дробления габбро-диабазы. Всего было испытано 30 вариантов составов с различными битумными вяжущими от различных производителей (ЛУКОЙЛ, Газпромнефть, Роснефть и пр.). Для каждого варианта асфальтобетонной смеси на гираторе подготавливалась серия образцов до 100 оборотов диаметром 100 мм и толщиной 62 мм. Далее образцы термостатировались при минус 18 градусах не менее 7 часов, после чего проводили испытание на непрямо растяжение на прессе ДТС-100 (10 кН). Данные с прибора передавались на компьютер и затем обрабатывались в программе. На рисунке 2 приведены характерные кривые, получаемые при испытании асфальтобетона с различными битумными вяжущими. Как видно из графика зависимости нагрузки от деформации, восприимчивость нагрузки асфальтобетона существенно зависит от применяемого

вяжущего. В асфальтобетоне на битуме БНД быстро возрастает напряжение и происходит резкий спад после достижения максимального пика, т.е. происходит хрупкое разрушение. Кривая нагрузка-деформация асфальтобетона на ПБВ и, в особенности, РГ вяжущих выглядит более плавно как при достижении пиковой нагрузки, так и после при разрушении образцов. Важным является момент или точка разрушения, т.е. то, что мы принимаем за разрушение образца или полное раскрытие, образование трещины, поскольку достижение пика нагрузки еще не является разрушением асфальтобетона. Разрушение образца и образование (раскрытие) трещины происходит уже на стадии пост-пик нагрузки, после достижения и прохождения пика. Если придерживаться общих принципов, то моментом разрушения можно считать 50% потерю прочности или падение нагрузки на 50%. В нашем случае мы приняли, что асфальтобетон разрушается и происходит полное раскрытие трещины при падении прочности до 50% от максимальной пиковой нагрузки. Нами был проведен расчет по всем 30 вариантам асфальтобетона с различными вяжущими и проведена оценка вариации данных в каждом тесте для прочности при растяжении, энергии разрушения,

вертикальной деформации как для пиковых значений, так и для точки разрушения 50% пост-пик нагрузки. Что интересно, происходит снижение вариации данных для точки разрушения — как для энергии деформации, так и для вертикальной деформации, что свидетельствует о повышении точности результатов испытания при анализе по точке разрушения в 50% от максимума пост пикового значения, а не по максимальной пиковой нагрузке. В качестве характеристики битумного вяжущего взяли испытание на растяжимость при 0 °С с определением длины растяжения образцов, максимального усилия и работы на растяжение (площадь под графиком усилие-растяжение). Стандарт ГОСТ EN 13703–2013 позволяет рассчитать энергию деформации (разрушения), но фактически это невозможно, поскольку площадь сечения битумного вяжущего меняется существенно в процессе испытания в течение длительного времени. К тому же, начальная площадь сечения у всех образцов битума одинаковая, что не повлияет на результат. Поэтому было принято решения использовать в качестве характеристики — работу на растяжение битума, площадь под кривой нагрузка-растяжение. Второй показатель, с которым проводилось сравнение трещиностойкости, это нижняя фактическая

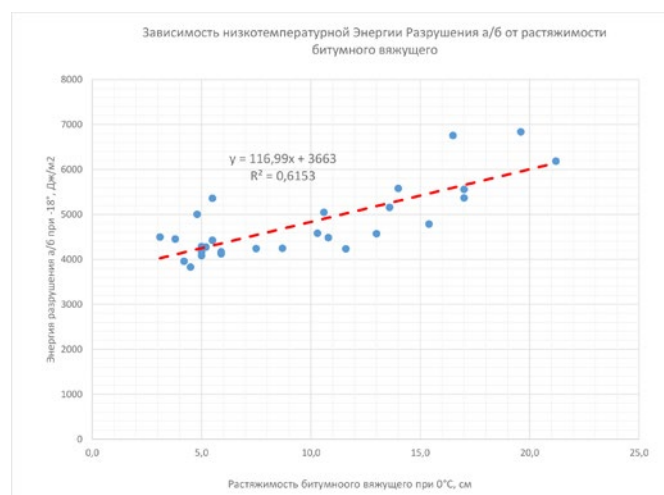


Рисунок 4. График зависимости энергии разрушения асфальтобетона при минус 18°C от растяжимости вяжущего при 0°C без вяжущих РГ с низкой маркой



граница PG. Марку PG удалось определить не для всех вяжущих, т.к. первоначально ставили задачу определить зависимость растяжимости битума от энергии разрушения асфальтобетона или низкотемпературной трещиностойкости. Благодаря коллегам из «Газпромнефть — Битумные материалы» у нас есть пять вяжущих, испытания по которым дополнительно проводились на ABCD-тесте с определением нижней фактической границы PG (далее эти данные будут приведены). Отечественные и зарубежные исследования показывают, что показатель растяжимость битумного вяжущего имеет взаимосвязь как с нижней фактической маркой PG, так и с трещиностойкостью асфальтобетона. К тому же, испытание на растяжение — это простой метод, который есть и используется практически во всех дорожно-строительных лабораториях РФ. Растяжимость при 0 °С присутствует в основных показателях межгосударственного стандарта на битум ГОСТ 33133. Таким образом, в данной работе было уделено значительное внимание этому показателю. Кроме того, были различные попытки найти взаимосвязь с другими показателями, но они не принесли желаемого результата.

На графике (рисунок 3) показана взаимосвязь энергии разрушения асфальтобетона на различных вяжущих с растяжимостью битумного вяжущего при 0 °С и скорости 1 см/мин.

Как видно из графика, энергия разрушения имеет хорошую взаимосвязь с растяжимостью битумов. Выделяются две точки — это два вяжущих с очень высокой растяжимостью при 0 °С и низкой маркой PG ниже минус 40 °С. Если убрать эти две точки, то тенденция, взаимосвязь сохранится, но с меньшей достоверностью (рисунок 4). Т.е. при сужении диапазона по растяжимости будет наблюдаться снижение взаимосвязи, поскольку значения концентрируются вокруг малого интервала данных на уровне погрешности испытания или низкой вариативности данных. Например, если взять данные по энергии разрушения

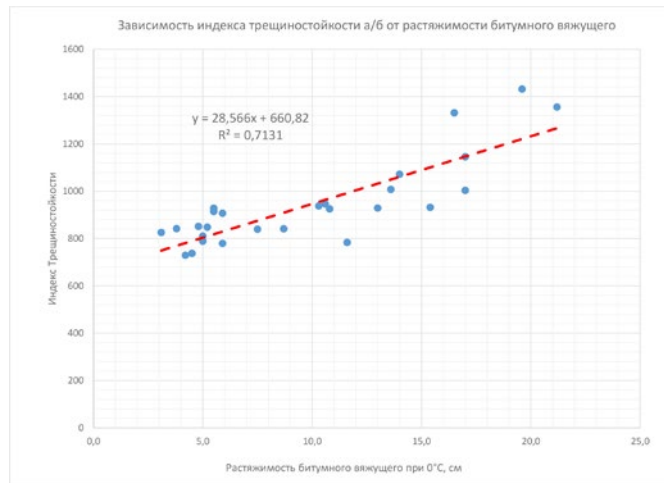
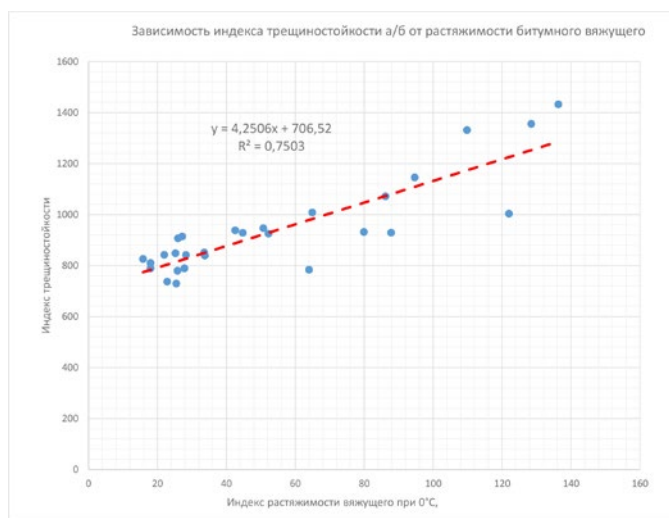


Рисунок 5. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18°С от растяжимости вяжущего при 0°С без вяжущих PG с низкой маркой



$$\text{ИТР} = 1000 \times \frac{G_f}{S} \quad (3)$$

Где ИТР — индекс трещиностойкости;  
 $G_f$  — энергия разрушения (трещинообразования), Дж;  
 $S$  — Прочность при непрямом растяжении, кПа  
 1000 — масштабирующий коэффициент, для удобства расчета.

На рисунке 5 приведен график зависимости индекса трещиностойкости и растяжимости битумного вяжущего — без двух вяжущих с очень низкой фактической маркой PG. Из анализа полученной зависимости видно улучшение величины достоверности в сравнении с данными, приведенными на рисунке 4, на 16%, что свидетельствует о правильном направлении выбранного подхода. Индекс трещиностойкости увеличивается линейно при увеличении растяжимости битумного вяжущего. Значение индекса трещиностойкости для песчаного асфальтобетона на чистых битумах концентрируется в районе 800, а для модифицированных и полимер битумных вяжущих характерны более высокие значения в районе от 900 до 1400, но в целом, как показано на рисунке 5, зависит от растяжимости.

При испытании битумного вяжущего на растяжение мы дополнительно определяли максимальное усилие при растяжении и работу (площадь под кривой нагрузка-растяжение). При анализе данных возник вопрос, возможно ли применение подхода, аналогичного к индексу трещиностойкости асфальтобетона с определением индекса растяжимости. Чем выше работа на растяжение битумного вяжущего, тем сильнее битум сопротивляется растягивающим деформациям и выше будет его когезионная прочность. С максимальным усилием будет обратная картина — чем выше усилие, тем жестче битум, тем сильнее будет его реакция на понижение температуры. Мы проводим измерение растяжимости при 0 °С с постоянной скоростью, что позволяет проводить испытание достаточно быстро, и это в результате дает нам различные максимальные усилия для битумных вяжущих. При снижении температуры вырастет и максимальное усилие и повысится хрупкость материала;

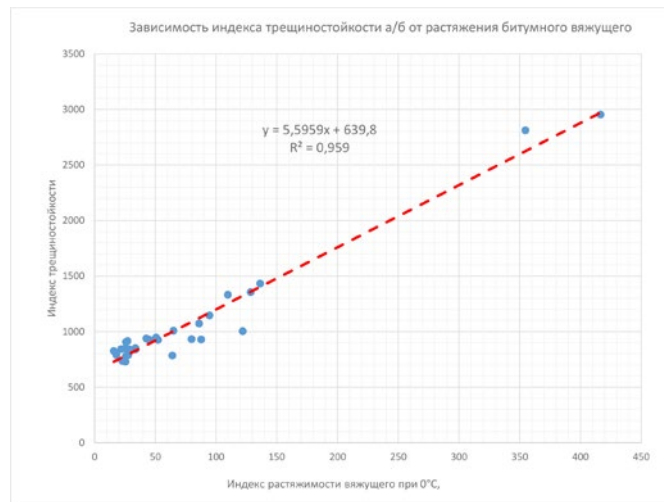


Рисунок 7. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18 °С от индекса растяжимости вяжущего при 0 °С (ИРА)

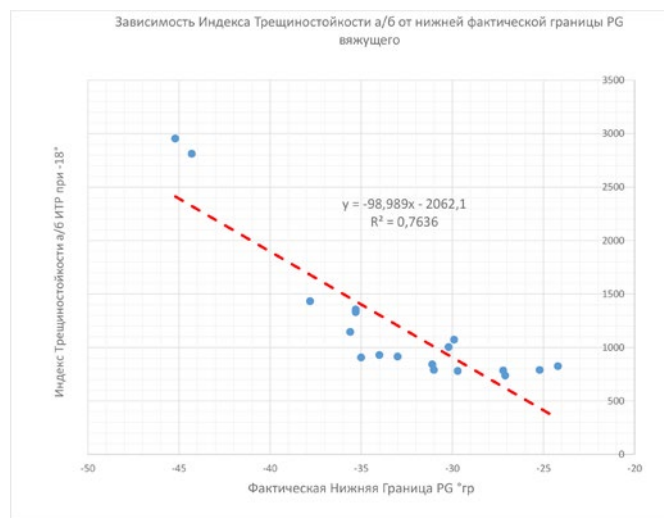


Рисунок 8. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18 °С от фактической нижней границы PG

значит, чем ниже максимальное усилие при 0 °С, тем фактически лучше. Это тот же принцип, что при расчете индекса трещиностойкости. Таким образом, мы можем рассчитать индекс растяжимости битумного вяжущего (формула 4):

$$\text{ИРА} = 1000 \times \frac{A_b}{P_{\max}} \quad (4)$$

Где ИРА — индекс растяжимости битумного вяжущего;

$A_b$  — работа на растяжение битумного вяжущего (площадь под кривой усилие-растяжение), Н\*м;

$P_{\max}$  — максимальное усилие при растяжении, Н.

В результате был проведен расчет и построен график (рисунке 6) зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) от индекса растяжимости (ИРА).

Из графика, показанного на рисунке 6, видно улучшение взаимосвязи между трещиностойкостью и свойствами битумных вяжущих через индексы трещиностойкости

и растяжимости. В случае добавления в наш расчет битумных вяжущих с очень низкой маркой PG, мы будем наблюдать существенное улучшение достоверности (рисунке 7). В то же время остается возможность для дальнейшего проведения эксперимента и наработки статистики.

Таким образом, видно, что между растяжимостью битумного вяжущего, ее производными показателями существует взаимосвязь с показателем индекса трещиностойкости для асфальтобетона. Есть ли у индекса трещиностойкости взаимосвязь с другими характеристиками битумного вяжущего? На рисунке 8 приведен график зависимости индекса трещиностойкости с нижней границей марки PG. Как видно из графика, чем ниже фактическая марка вяжущего, тем выше индекс трещиностойкости, есть обратная взаимосвязь. К сожалению, марка вяжущего была определена не для всех битумных вяжущих в данном

эксперименте, поэтому здесь есть перспектива дальнейшей работы с наработкой статистики и улучшением достоверности.

Как описывалось выше, на пяти битумных вяжущих была определена нижняя фактическая марка PG на приборе ABCD, в результате была возможность посмотреть, есть ли связь между границей PG по ABCD и индексом трещиностойкости. На рисунке 9 показана эта зависимость. Результаты испытаний на ABCD были предоставлены коллегами из лаборатории «Газпромнефть-БМ». Конечно, данных достаточно мало, чтобы делать окончательные выводы, но, по всей видимости, индекс трещиностойкости (ИТР) имеет хорошую чувствительность к низкотемпературным характеристикам битумного вяжущего.

Еще одной важной проверкой являлось определение взаимосвязи индекса трещиностойкости и содержания битумного вяжущего. Были выбраны два битумных вяжущих — БНД 70/100 и PG 70–28, на рисунке 10 представлены полученные результаты. Как видно из полученных данных, есть прямая взаимосвязь между индексом трещиностойкости асфальтобетона и содержанием битумного вяжущего; с увеличением содержания битумного вяжущего происходит рост индекса трещиностойкости, при этом свойства самого вяжущего влияют на трещиностойкость сильнее, чем увеличение содержания вяжущего.

Увеличение содержания битумного вяжущего на 2% дает прирост по индексу трещиностойкости примерно на 50%. За счет увеличения содержания битумного вяжущего можно улучшить трещиностойкость, но при этом необходимо учитывать, что это может привести к снижению колееустойчивости. Это дает дополнительную возможность использовать комплексный подход к определению оптимального содержания битумного вяжущего. Колееустойчивость имеет обратную зависимость, чем больше битумного вяжущего, тем ниже сдвигустойчивость. Трещиностойкость имеет прямую зависимость, чем выше содержание битумного вяжущего, тем лучше трещиностойкость. В нашем случае оптимальным будет содержание

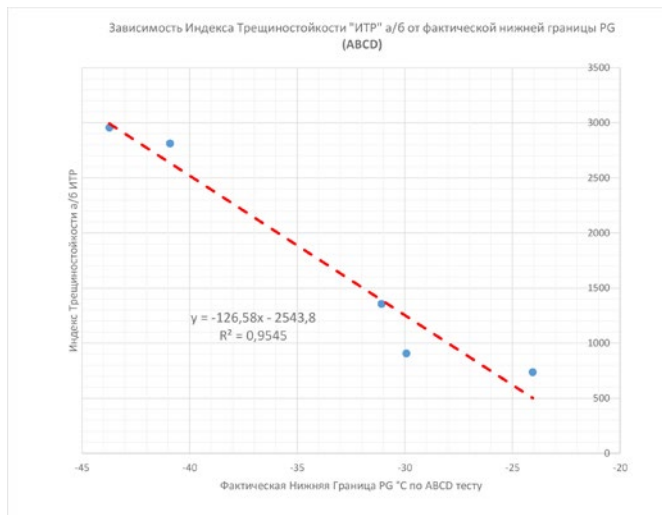


Рисунок 9. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) асфальтобетона при минус 18°C от фактической нижней границы PG, измеренной на приборе ABCD



Рисунок 10. График зависимости индекса трещиностойкости (ИТР) песчаного асфальтобетона при минус 18°C от содержания битумного вяжущего

вяжущего, при котором обеспечивается колееустойчивость при максимальной трещиностойкости.

Таким образом, в проведенном исследовании показана взаимосвязь между свойствами битумного вяжущего и индексом трещиностойкости асфальтобетона, определяемого при минус 18 °С. Возможности использования индекса трещиностойкости позволяют:

- ◆ Сравнить асфальтобетоны с различными вяжущими по трещиностойкости;
- ◆ Определять влияние различных модификаторов и добавок на низкотемпературные свойства асфальтобетона;

- ◆ Регулировать содержание вяжущего в асфальтобетонной смеси для улучшения сопротивления растрескиванию;
- ◆ Выбирать оптимальное содержание битумного вяжущего;
- ◆ Проводить контроль качества по низкотемпературной трещиностойкости.

В дальнейшем планируем использовать индекс трещиностойкости (ИТР) при проведении испытаний асфальтобетона в текущей работе для наработки статистики и определения количественных характеристик для различных типов и видов асфальтобетонов. ■

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесник Д. А., Шапченко Д. В. Новые тенденции в области испытаний асфальтобетона // Мир дорог. – 2018. – №115. – С. 44–46.
2. Пахаренко Д. В., Колесник Д. А. Опытнo-экспериментальные работы ЗАО «ВАД» // Дорожная техника. – 2016. – №1. – С. 28–35.