

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ КИНЕТИКИ РОСТА ПРОЧНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ИЗ ДОРОЖНЫХ ЭМУЛЬСИОННО- МИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ДОБАВКАМИ

ANALYTICAL DEPENDENCE FOR THE ESTIMATION  
OF KINETICS OF IN TIME STRENGTH GROWTH  
OF STRUCTURAL LAYERS MADE WITH THE APPLICATION  
OF ROAD EMULSION-MINERAL MIXTURES WITH ADDITIVES

**П. В. Вавилов,**

начальник лаборатории  
республиканского дочернего  
унитарного предприятия  
«Белорусский дорожный  
научно-исследовательский  
институт «БелдорНИИ»,  
г. Минск, Беларусь

**С. Е. Кравченко,**

кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой  
«Строительство и эксплуатация  
дорог» Белорусского  
национального технического  
университета,  
г. Минск, Беларусь

*В статье предлагается аналитическая зависимость для оценки кинетики роста прочности во времени конструктивных слоев из дорожных эмульсионно-минеральных смесей (далее – ЭМС) с добавками. Рассмотрены примеры использования предложенной зависимости для оценки эффективности добавок, ускоряющих кинетику набора прочности материалами из эмульсионно-минеральных смесей.*

*The article gives the analytical dependence for the estimation of the kinetics of in time strength growth of structural layers made with the application of road emulsion-mineral mixtures with additives. The examples of the application of the analytical dependence according to evaluation of the effectiveness of additives that accelerate the kinetics of strength growth of materials made with the application of emulsion-mineral mixtures are given.*

## ВВЕДЕНИЕ

Применение эмульсионно-минеральных смесей в дорожной практике является одним из путей успешной реализации Государственной программы по развитию и содержанию автомобильных дорог в Республике Беларусь на 2015–2019 годы в части устройства усовершенствованного покрытия на всех гравийных участках республиканских дорог, обеспечения твердым покрытием грунтовых дорог в основном с использованием отечественных материалов. К настоящему времени имеется технологическая и материаловедческая база для приготовления ЭМС, их укладки при устройстве конструктивных слоев дорожной одежды и последующего содержания при эксплуатации.

Тем не менее, с учетом того, что прочность материалов из дорожных эмульсионно-минеральных смесей значительно изменяется в процессе формирования, необходимо знать закономерности, описывающие кинетику роста прочности во времени, не только для правильного понимания процесса структурообразования таких материалов, но и для решения практических задач: подтверждения соответствия материала требованиям технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА), подбора состава ЭМС, определения эффективности добавок целевого назначения.

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ,  
ОПИСЫВАЮЩИЕ КИНЕТИКУ РОСТА  
ПРОЧНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ  
МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДОРОЖНЫХ  
ЭМУЛЬСИОННО-МИНЕРАЛЬНЫХ  
СМЕСЕЙ**

Ранее была предложена зависимость, описывающая кинетику роста прочности во времени материала из ЭМС, которая позволяет «экстраполировать график нарастания прочности по крайней мере до 90–100 суток» [1]:

$$R = a + b \cdot \lg T, \quad (1)$$

где  $R$  – прочность материала при сжатии в возрасте  $T$ , сут.;

$a$  и  $b$  – искомые коэффициенты, определяемые с помощью метода наименьших квадратов.

Рассмотрим (1) в начальный момент  $T_0 = 1$ , когда материал из ЭМС будет обладать некоторой эмпирически определяемой начальной прочностью, поскольку момент  $T_0 = 0$  соответствует началу перемешивания всех компонентов ЭМС в смесителе. Так как  $\lg 1 = 0$ , то (1) можно преобразовать, перейдя при этом к новому основанию, следующим образом:

$$R = a + b \cdot \lg T - \lg T_0 = a + c \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right), \quad (2)$$

где  $R$  – прогнозируемый расчетным способом предел прочности при сжатии материалов из ЭМС, МПа;

$a$  – свободный член аналитической зависимости, характеризующий начальную прочность на сжатие

материалов из ЭМС в момент времени  $T_0 = 1$  ед. времени (сутки, часы). МПа;

$c$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения прочности на сжатие материалов из ЭМС. МПа;

$T$  – время наблюдения. ед. времени (сутки, часы);

$T_0 = 1$  – момент наблюдения, в который определяется начальная прочность материалов из ЭМС, ед. времени (сутки, часы).

Далее на примере рассмотрим использование зависимости (2) при описании закономерностей кинетики роста прочности материалов из ЭМС. В таблице 1 приведены свойства материалов из ЭМС, состоящих из щебня гранитного фракции 5–20 мм и отсева дробления горных пород (соответствующее соотношение указано в условном обозначении) и битумной эмульсии ЭБКД-М-60 с расходом 8,5 % сверх массы минеральной части на битуме БНД 90/130 (эмульгатор на основе полиаминов – 9,0 кг/т, соляная кислота до pH = 2).

В таблице 2 приведены результаты обработки данных таблицы 1 в MS Excel с использованием (2) для случаев, когда возраст  $T$  образцов материалов из ЭМС определяется в часах и сутках (что более удобно с практической точки зрения).

Во-первых, приведенный пример показывает, что масштаб шкалы времени при описании кинетики набора прочности материалов из ЭМС не принципиален, поскольку коэффициент  $c$ , характеризующий скорость изменения прочности при сжатии асфальтобетона из ЭМС, что логично, не зависит от выбранного масштаба времени; параметр  $a$ , характеризующий

Таблица 1 – Составы материалов из ЭМС и их свойства

Условное обозначение состава	Предел прочности при сжатии при 20°С через час, МПа	В возрасте 14 суток					
		средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	водонасыщенные образцы $W$ , % по объему	набухание образца $N$ , % по объему	предел прочности при сжатии при 50 °С, МПа	предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа	коэффициент длительной водостойкости
30/70	1,22	2,38	7,5	0,20	0,50	2,74	0,46
50/50	1,50	2,42	6,5	0,13	0,41	2,61	0,57
70/30	1,64	2,42	5,6	0,00	0,39	2,44	0,71
Требования [2, 3]	Не нормируется	Не нормируется	Не более 10	Не более 2,0	Не нормируется	Не менее 1,2	Не менее 0,5

Таблица 2 – Сравнение параметров зависимостей, описывающих кинетику роста прочности материалов из ЭМС

Условное обозначение состава	Зависимость (2), $T$ в часах		Зависимость (2), $T$ в сутках	
	$a$	$c$	$a$	$c$
30/70	1,22	0,2613	2,05	0,2613
50/50	1,50	0,1908	2,11	0,1908
70/30	1,64	0,1375	2,08	0,1375

начальную прочность в момент времени  $T_0 = 1$ , также при расчете в любом масштабе времени дает одинаковые значения.

Во-вторых, данные таблиц 2 и 3 указывают на ряд проблем, существующих при подборе состава ЭМС и определении эффективности «уплотняющих добавок» [2, 3]. Не рассматривая здесь все аспекты терминологических проблем относительно ЭМС, которые частично выносились на обсуждение [4], следует отметить несколько важных вопросов, требующих рассмотрения:

- для всех приведенных составов нормируемое значение прочности достигается через 1 час, т. е. согласно ТНПА [2, 3] их следовало бы относить к материалам с ускоренным формированием. Но достижение материалом из ЭМС нормируемой прочности на сжатие не означает фактического завершения его структурообразования. Для материалов из ЭМС с ускоренным формированием определение водонасыщения и набухания в раннем возрасте (до 7 суток) с целью подтверждения соответствия нормативным требованиям некорректно, поскольку поры материала еще частично заполнены водой (предварительного увлажнения и водой, отведенной из эмульсии) [5];

- при подборе составов ЭМС с ускоренным формированием в соответствии с [2, 3], когда фактически отсутствуют показатели, характеризующие срок службы материалов из ЭМС, отказ от определения показателя «коэффициент длительной водостойкости» может означать выбор состава с высокой прочностью и низкой водостойкостью (таблица 1), что для климатических условий Беларуси может привести к низкой эксплуатационной долговечности дорожного покрытия;

- некорректная терминология и испытательные методики, относящиеся к добавкам в ЭМС. В ТНПА [2, 3] существуют термины «уплотняющая добавка (ускоритель формирования)» и «добавка-ускоритель формирования», хотя показатели плотности или количества воды в материале не нормируются и не контролируются, а термины «формирование» или «ускорение формирования» отсутствуют.

В сущности, в ТНПА [2, 3] речь идет о добавках, направленных на ускорение кинетики набора прочности материалами из ЭМС, поскольку основным индикатором эффективности добавок является достижение прочностью на сжатие нормируемого значения, а не плотность или минимальное содержание воды в объеме материала. При этом существующий подход к определению эффективности добавок в контексте вышеназванных вопросов требует уточнения, что будет показано на примере.

Рассмотрим составы и свойства материалов из ЭМС, изученные в [6]. На рисунке 1 приведены дан-

ные о гранулометрических составах минеральных частей, состоящих из щебня доломитового с песком природным (№ 1) и песчано-гравийной смеси с песком природным (№ 2). В качестве вяжущего использовалась битумная эмульсия ЭБКД-М-60 с расходом 8,5 % сверх массы минеральной части на битуме БНД 90/130 (эмульгатор на основе полиаминов – 7,0 кг/т, соляная кислота до pH = 2). В таблицах 3 и 4 приведены физико-механические свойства материалов из ЭМС контрольных (№ 1 и № 2) и основных составов (с добавками серии Stabiram). Контрольные составы отличаются от основных только наличием соответствующей добавки (условное обозначение приведено в таблице 3). Добавки в количестве 2 кг/т эмульсии вводились в битумную эмульсию указанного выше состава в процессе ее приготовления.

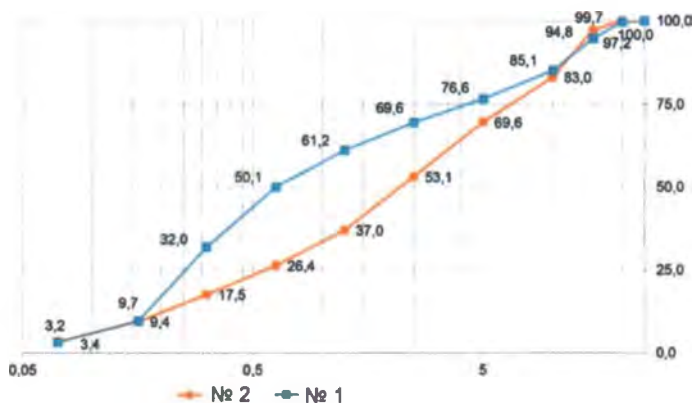


Рисунок 1 – Гранулометрический состав минеральной части ЭМС

Анализируя данные таблицы 3, можно сделать следующие выводы:

- методика определения эффективности добавок в ЭМС должна предусматривать сравнительные испытания составов без добавки и с добавками. Так, например, данные таблицы 3 по прочности свидетельствуют, что необходимости в улучшении состава № 2 путем введения уплотняющих добавок нет, для состава № 1 такая необходимость не является очевидной;

- более корректно проводить испытания материалов из ЭМС на соответствие физико-механических свойств требованиям ТНПА в нормативном возрасте, когда основная масса воды покинет материал и свойства стабилизируются. Кроме того, коэффициент длительной водостойкости является важной характеристикой эксплуатационной долговечности конструктивных слоев из ЭМС, а его определение возможно по истечении 14 суток;

- влияние добавок на плотность материалов из ЭМС составляет менее 5 %, поэтому необходимо скорректировать терминологию.

Далее оценим эффективность использованных добавок по методике, предложенной в [7]. В таблице 4



Таблица 3 – Физико-механические свойства материалов из ЭМС

Условное обозначение состава	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>			Водонасыщение W, % по объему			Предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа			Коэффициент водостойкости			Коэффициент длительной водостойкости
	1 сут	7 сут	14 сут	1 сут	7 сут	14 сут	1 сут	7 сут	14 сут	1 сут	7 сут	14 сут	
№ 1	2,24	2,19	2,18	x	11,7	11,9	0,52	1,66	1,66	x	0,45	0,93	0,69
St 502	2,24	2,23	2,21	15,4	10,7	10,7	0,65	1,85	1,80	0,28	0,50	0,98	0,51
St 506	2,25	2,22	2,22	14,8	11,0	10,3	0,80	1,85	1,51	0,14	0,57	1,23	0,53
St 508	2,25	2,20	2,18	13,6	11,6	11,9	0,78	1,78	1,99	0,28	0,54	0,75	0,57
St 510	2,24	2,21	2,22	17,5	10,9	10,7	0,70	1,63	1,51	0,13	0,55	1,03	0,59
№ 2	2,25	2,23	2,24	10,2	9,5	9,7	1,51	1,58	1,81	0,49	0,79	0,88	0,49
St 502	2,27	2,26	2,25	11,1	8,5	8,8	1,48	1,62	1,38	0,43	0,73	1,07	0,74
St 506	2,27	2,24	2,25	10,7	9,7	9,5	1,10	1,57	1,67	0,52	0,80	1,00	0,58
St 508	2,26	2,23	2,25	11,3	9,4	8,9	1,21	1,73	1,77	0,40	0,77	0,96	0,52
St 510	2,27	2,23	2,22	11,9	9,0	9,9	0,89	1,52	1,67	0,54	0,70	0,82	0,58
Требования [2, 3]	x			Не более 12			Не менее 1,0			Не менее 0,5			Не менее 0,5

приведены результаты обработки данных таблицы 3 в MS Excel с использованием зависимости (2).

Таблица 4 – Сравнение параметров функций, описывающих кинетику роста прочности материалов из ЭМС, и критериев эффективности добавок

Условное обозначение состава	Логарифмическая зависимость вида (2)				
	a	c	r <sup>2</sup>	Δa, %	Δc, %
№ 1	0,5688	0,4654	0,9358	x	x
St 502	0,7073	0,4750	0,9166	24 %	2 %
St 506	0,8857	0,3278	0,7006	56 %	–
St 508	0,7976	0,4705	0,9914	40 %	1 %
St 510	0,7542	0,3440	0,8659	33 %	–
№ 2	1,4854	0,0968	0,7122	x	x
St 502	1,5148	-0,0140	0,0254	2 %	–
St 506	1,1081	0,2215	0,9917	–	129 %
St 508	1,2274	0,2241	0,9636	–	132 %
St 510	0,8989	0,3017	0,9946	–	212 %

Примечание – r<sup>2</sup> – коэффициент достоверности аппроксимации.

Анализируя данные таблиц 3 и 4, можно сделать следующие основные выводы:

- предложенная аналитическая зависимость (2), описывающая закономерность кинетики набора прочности материалами из ЭМС, является адекватной для 9 составов из 10, поскольку величина коэффициента достоверности аппроксимации близка к 1,0;

- полученные данные свидетельствуют об эффективности введения добавок в состав № 1, и указывают на их адгезионный механизм;

- большие значения рассчитанного критерия эффективности Δa (Δc) для состава № 2 с добавками могут ввести в заблуждение относительно действенности добавок, поэтому обязательно необходимо учитывать механизм действия добавки для правильной интерпретации результатов. Согласно [8] добавки серии Stabiram должны ускорять процессы адсорбции, т. е. действовать по адгезионному механизму. В связи с этим, а также на основании анализа фактических значений прочности в различном возрасте следует признать, что введение указанных добавок в состав № 2 нецелесообразно, а значения самих критериев функциональной эффективности необходимо ограничить диапазоном 15 %–100 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитическая зависимость вида (2) позволяет описывать закономерности роста прочности конструктивных слоев из дорожных эмульсионно-минеральных смесей, в том числе с добавками, ускоряющими кинетику набора ими прочности. Использование предложенной аналитической зависимости и уточнений терминологии и методологии, изложенных в настоящей статье, позволит обоснованно подходить к определению целесообразности применения таких добавок и прогнозировать расчетным способом прочность материалов из эмульсионно-минеральных смесей для конструктивных слоев дорожных одежд.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хавкин, Б. М. Закономерности нарастания прочности битумоминеральных материалов на эмульсии / Б. М. Хавкин // Труды СоюздорНИИ. – М., 1974. – Вып. 71 : Улучшение качества и совершенствование технологии применения битумных эмульсий. – С. 61–68.
2. Автомобильные дороги. Правила устройства покрытий и оснований из эмульсионно-минеральных смесей : ГКП 306-2011 / Департамент «Белавтодор». – Введ. 01.06.2011. – Минск : БелдорНИИ, 2011. – 24 с.
3. Смесей эмульсионно-минеральные дорожные. Технические условия : СТБ 2413-2015 / Госстандарт. – Введ. 01.12.2015. – Минск, 2015. – 16 с.
4. Вавилов, П. В. К вопросу о необходимости внесения изменений в нормативные требования к эмульсионно-минеральным смесям для устройства несущих слоев дорожных одежд / П. В. Вавилов, С. Е. Кравченко, Н. В. Радьков // Автомобильные дороги и мосты. – 2013. – № 2. – С. 80–85.
5. Emulsion cold mixes: materials with changing properties: Study of curing and its impact on the characteristics of the residual binder / J.-E. Poirier, X. Carbonneau, J.-P. Henrat // RGRA. – 2002. – April. – № 805.
6. Исследование, совершенствование составов, технологии получения и применения эмульсионно-минеральных смесей с ускоренным сроком формирования : отчет о НИР (заключ.) / Государственное предприятие «БелдорНИИ» ; рук. М. Г. Жуковин ; исполн. : У. Г. Сушкевич [и др.]. – Минск, 2009. – 92 с. – № ГР 20071425. – Арх. № 1113.
7. Вавилов, П. В. Классификация и критерии эффективности применения добавок в эмульсионно-минеральных смесях П. В. Вавилов, С. Е. Кравченко Вестник Ш У. – 2015. – № 8. – С. 103–108.
8. Barreto, G. Compacting additives in cold techniques // Plenary Lecture Theme 4-03, Proc., 3rd World Congress on Emulsions. – Lyon, France, 2002.
9. Кравченко, С. Е. Критерий усталостной повреждаемости для прогнозирования долговечности холодных асфальтобетонов из эмульсионно-минеральных смесей С. Е. Кравченко, П. В. Вавилов // Автомобильные дороги и мосты. – 2014. – № 1. – С. 54–60.
10. Смесь эмульсионно-минеральная с адгезивом : заявка № а20130753 Респ. Беларусь : МПК С 08L 95/00 С 04В 26,26 / Вавилов П. В., Асташко В. В., Недолугин О. Н., Кравченко С. Е., Рыбинский А. Г., Хлебовец, О. А.; заявитель республиканское дочернее унитарное предприятие «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «БелдорНИИ»; заявл. 14.06.2013; опубл. 02.28.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 16.

*Статья поступила в редакцию 18.10.2016.*