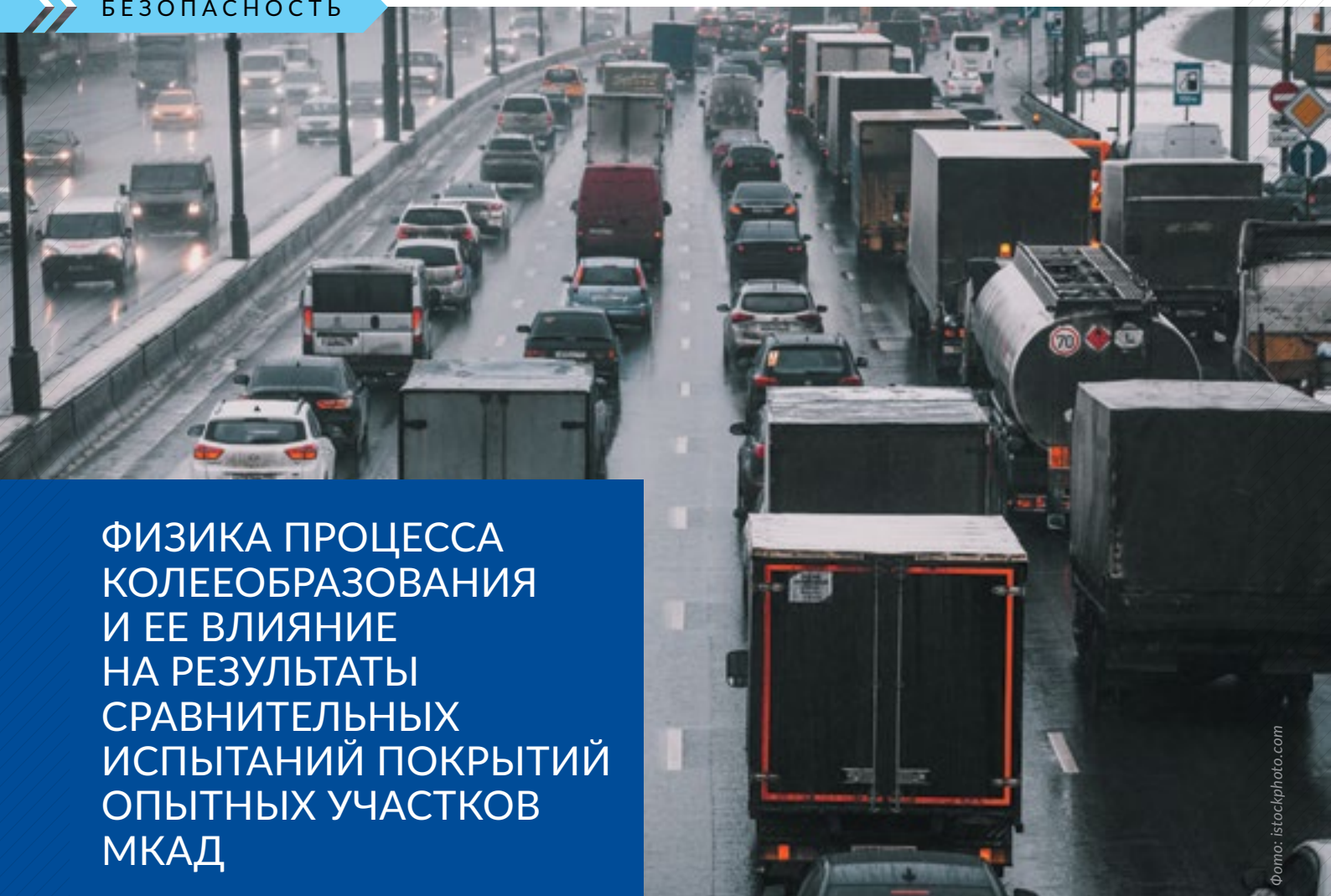




ФИЗИКА ПРОЦЕССА КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОКРЫТИЙ ОПЫТНЫХ УЧАСТКОВ МКАД

Колейность дорожных покрытий является опасной неровностью, приводящей к аварийным ситуациям. Наиболее опасны колеи на автомагистралях со скоростным движением при наличии на покрытии воды.

Вода в колеях ухудшает видимость, снижает сцепные качества, а при высоких скоростях движения может привести к полной потере контакта передних колес с покрытием. Наличие воды особую опасность представляет на участках дорог, где левая и правая колеи существенно различаются своей глубиной.

При высокой скорости вода оказывает большое сопротивление движению — это известно любому опытному водителю. Так, во время дождя водитель, с большой скоростью въезжая даже в неглубокую лужу, ощущает резкое торможение. В том же случае, когда одна из колеи заполнена слоем воды существенно большей толщины, чем другая, создается разворачивающий момент, способный сместить автомобиль с полосы движения. Дело усугубляется еще и тем, что колесо, взаимодействующее с толстым слоем воды, теряет сцепной вес вплоть до его полного обнуления при аквапланировании. Другое же колесо автомобиля, взаимодействующее со слоем воды существенно меньшей

толщины, создает тяговую силу, мгновенно обнулить которую из-за большого момента инерции вращающихся масс невозможно. Тяговая сила создает разворачивающий момент, который складывается с моментом, создаваемым другим колесом.

При содержании дорог для предотвращения аварий важно не допустить появления участков с колеями, превышающей допустимый нормативными документами предел. Необходимо учитывать тот факт, что в дождь под слоем воды водитель не в состоянии оценить глубину колеи и ее опасность. Поэтому попавшего в аварию водителя на дорожном участке, имеющем глубину колеи выше допустимой, нельзя обвинять в нарушении пункта 10.1 Правил дорожного движения, который требует снижения скорости вплоть до полной остановки автомобиля, поскольку опасность в сложившихся условиях водитель не мог своевременно обнаружить.

Сегодня наличие глубокой колеи на покрытии автомагистралей является единственным фактором, требующим проведения дорогостоящих ремонтов. В связи с этим выявление причин быстрого колееобразования, факторов, влияющих на темп роста глубины колеи, может способствовать повышению точности прогнозирования с целью своевременного выявления и ликвидации опасных мест, а также разработки мероприятий, направленных на снижение темпа роста глубины колеи.

Коллектив ООО ДИЛ при поддержке и помощи со стороны МАДИ, в порядке частной инициативы, исследованиями процесса колееобразования занимается с 2014 года, когда была создана лаборатория, оснащенная сканером, позволяющим фиксировать параметры колеи с погрешностью, не превышающей 1 мм. За эти годы измерена не одна тысяча километров дорожного покрытия на полосах движения автомагистралей. Основной целью этих измерений являлось выявление дорожных участков, колейность которых не отвечает требованиям нормативной литературы. В процессе этой работы постоянно возникали вопросы, найти ответы на которые без понимания механизма процесса колееобразования было невозможно. В частности, многие исследователи объясняют быстрый рост глубины колеи на автомагистралях широким применением шипованных шин в холодный период года. Однако далеко не всегда фактические значения глубин колеи можно объяснить ролью шипованных шин.

На рис. 1 представлен график, построенный по результатам измерений глубины колеи в левой полосе скоростной автомагистрали. Из графика следует, что на длине одного километра глубина колеи может меняться более чем в три раза, при этом на отдельных локальных участках превышать допустимые значения. Ролью шипованных шин такое явление объяснить невозможно. При рассмотрении графика может возникнуть предположение, что причиной таких резких перепадов глубин колеи может являться неоднородность материала, из которого изготовлен верхний слой покрытия. Однако измерения колеи на другом участке магистрали опровергли это предположение.

В 2020 году на полосе автомагистрали была зафиксирована глубокая колея. На приведенном (рис. 2) графике кривая имеет вид колокола. В 2021 году на участке протяженностью 400 м был выполнен ремонт, включающий фрезерование с целью выравнивания и укладку нового слоя асфальтобетона. Однако уже на следующий год в середине рассматриваемого участка колея была практически в два раза глубже, чем по его краям (рис. 3).

В 2024-м на этом же участке была зафиксирована по форме такая же колоколообразная кривая глубины колеи, как и в 2020 году. Темп роста в центре участка был на отдельных метрах как минимум в четыре раза выше, чем по его краям (рис. 4). В центре графика зафиксирован пик глубины, формирование которого началось сразу же после укладки (рис. 3). Для понимания причины происходящего на данном километре с использованием датчиков лаборатории был построен продольный профиль (рис. 5). На основе полученных материалов было сделано предположение, что главной причиной столь быстрого роста колеи является вода.

Рассматриваемый участок располагается на третьей полосе движения встречного направления, примыкаю-

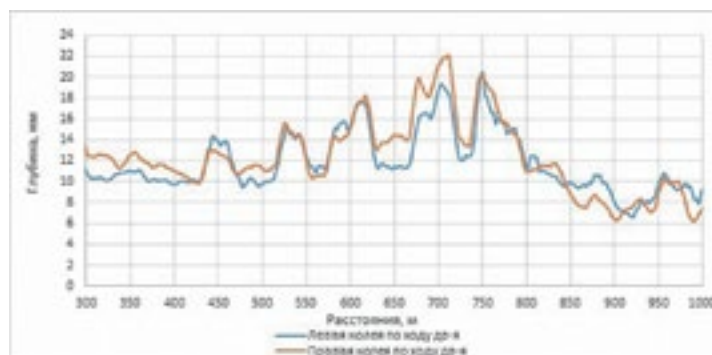


Рис. 1. Глубина колеи в левой полосе движения автомагистрали

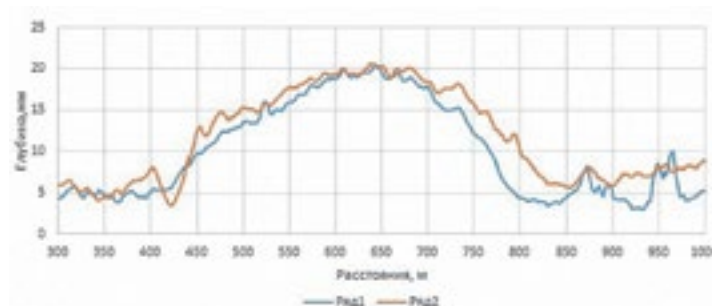


Рис. 2. Глубина колеи, зафиксированная на полосе движения в 2020 году

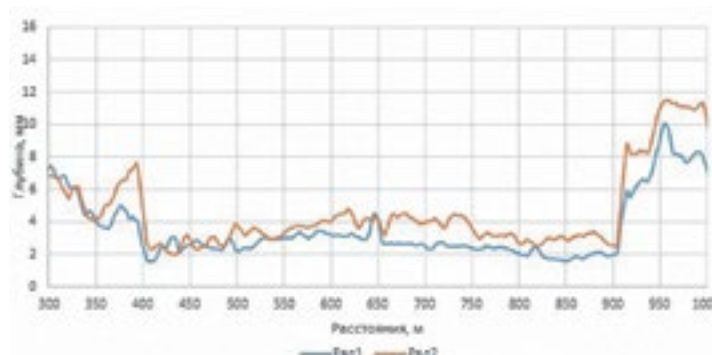


Рис. 3. Глубина колеи на рассматриваемом участке, зафиксированная в 2022 году

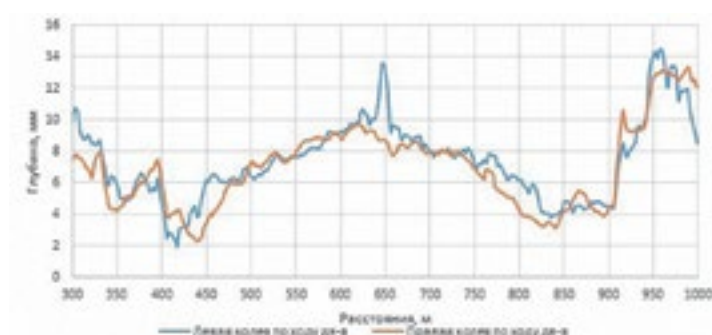


Рис. 4. Глубина колеи на рассматриваемом участке, зафиксированная в 2024 году

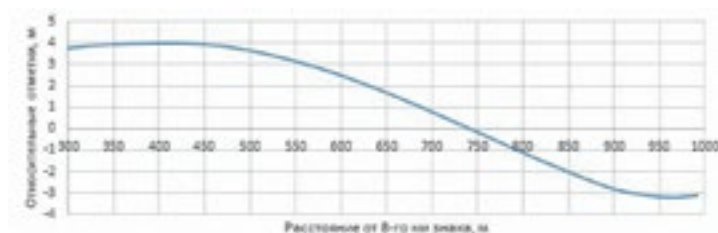


Рис. 5. Продольный профиль участка

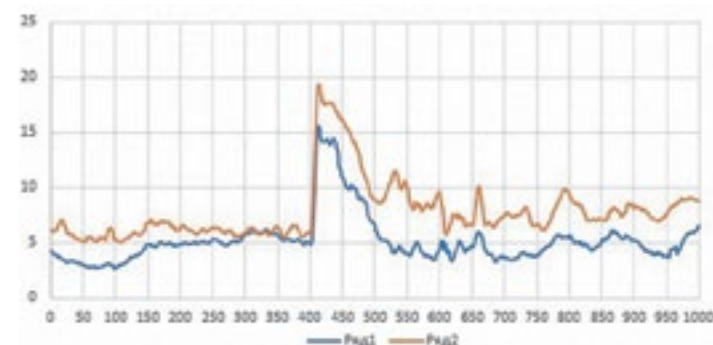


Рис. 6. Глубина колеи на спуске. Полоса наката: ряд 1 — левая, ряд 2 — правая

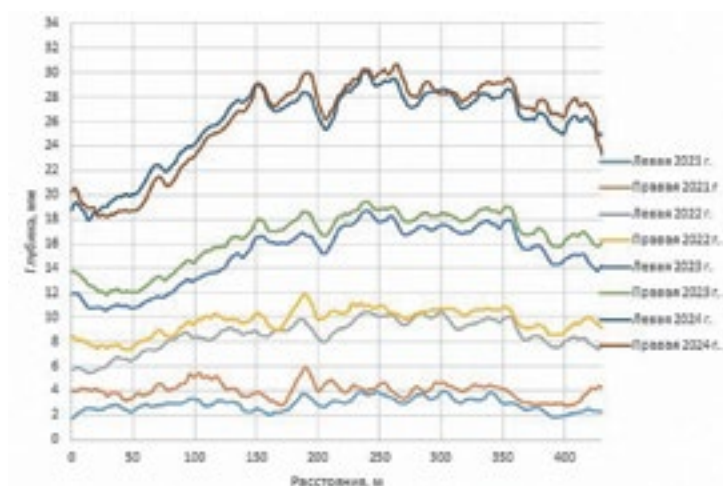


Рис. 7. Изменение глубины колеи на первом участке (ЩМА-20) со сроком службы

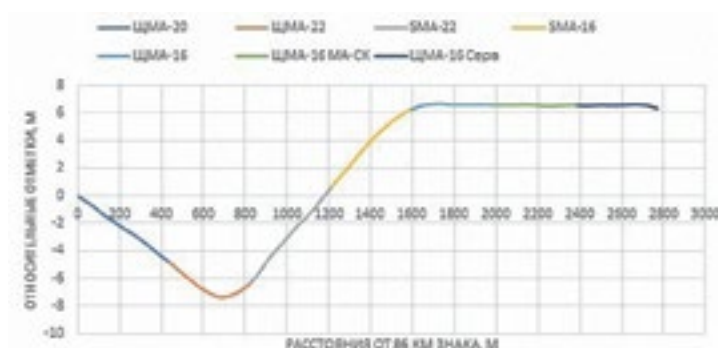


Рис. 8. Продольный профиль участков ремонта МКАД

щей к обочине. Максимальные значения глубины колеи зафиксированы на затяжном подъеме с небольшими значениями продольного уклона, ближе к его концу. В место с наибольшей глубиной колеи вода поступала не только по продольному уклону с рассматриваемой полосы, но и за счет поперечного уклона с двух левых полос движения. Очевидно, что шипованные шины в равной степени воздействуют на покрытие как на участках, где колея менее 3 мм, так и в местах, на которых уже сегодня глубина колеи достигла 14 мм. Поэтому использование шипованных шин нельзя назвать причиной столь быстрого роста колеи.

Похожий график был получен на той же дороге на полосе движения прямого направления (рис. 6). Место образования глубокой колеи зафиксировано на спуске с небольшим продольным уклоном.

Толщина слоя жидкости на покрытии и во время дождя, и в случае применения для борьбы с зимней скользкостью жидких реагентов зависит от большого количества факторов, в числе которых особая роль принадлежит ровности дорожного покрытия и стабильности поперечного уклона. Их влиянием на изменение глубины колеи можно объяснить наличие резких перепадов глубин на горизонтальном участке скоростной дороги (рис. 1). С этих позиций рассмотрим результаты измерений колеи на семи опытных участках МКАД, построенных на 86–89-м км весной 2021 года.

Коллективом нашей лаборатории в течение четырех лет, прошедших с момента устройства покрытий, в весение и осенние месяцы выполнялись регулярные обследования опытных участков, промежуточные результаты которых были опубликованы в журнале (1). Полученные в результате выполненных обследований данные позволили сделать вывод о том, что и на полосах легкового движения, и на грузовых полосах существенной разницы в глубинах колеи на различных материалах не наблюдалось. Сегодня на первой и второй полосах движения колея практически на всех опытных участках превысила допустимое значение (20 мм). Рассмотрим правомочность сделанных выводов с учетом влияния на процесс колееобразования параметров, характеризующих опытные участки.

На рис. 7 представлена динамика изменения глубины колеи в течение всего срока службы покрытия первого участка. В начале участка в 2024 году колея имела глубину 18 мм, а в его середине колея углубилась до 30 мм. Для объяснения столь значительных изменений глубины по длине участков проанализируем их геометрические параметры.

Как было показано выше, большую роль в формировании колеи играет вода. Оценим состояние покрытия опытных участков с точки зрения обеспеченности условий водоотвода. С этой целью, воспользовавшись возможностями ходовой лаборатории УДК-6, по данным, фиксируемым при каждом проезде, построим продольный профиль участков (рис. 8). Приведенный график показывает, что первый участок,

выполненный из ЩМА-20, располагается на спуске с уклоном 10–12‰, на втором участке из ЩМА-22, расположенном на вогнутой кривой, уклон меняется от –12‰ до +15‰, третий участок, из SMA-22, располагается на подъеме с уклоном 18–20 промилле, на четвертом участке, из SMA-16, крутизна подъема уменьшается с 20 до 5 промилле. Пятый участок, из ЩМА-16, частично располагается на выпуклой кривой, но большая его часть — на участке, близком к горизонтальному. Два участка, из ЩМА-МА-СК и ЩМА-16 (сера), расположены горизонтально, однако в конце последнего участка начинается спуск. Очевидно, что процесс водоотвода на опытных участках не идентичен. В наиболее сложных условиях оказался второй участок, расположенный на вогнутой кривой. При анализе результатов необходимо учитывать тот факт, что схема водоотвода резко меняется после того, как глубина колеи достигает 12–14 мм. При таких глубинах роль поперечного уклона снижается и вода начинает двигаться по колею за счет продольного уклона. В этом случае в результате уменьшения продольного уклона скорость потока воды снижается, а толщина ее слоя возрастает и при морозящих неинтенсивных осенних дождях колея полностью заполняется водой.

На кривых (рис. 7) местоположение отдельных пиков, зафиксированных в разные годы, полностью совпадает, их появление связано с местными нарушениями ровности покрытия и стабильности поперечного уклона. Сегодня ровность дорожного покрытия рассматриваемого участка отвечает действующим требованиям. Показатель ровности на первом участке первой полосы равен 1,2 мм/м и 1,33 мм/м на левой и правой полосе наката соответственно. Однако и на хорошо построенных покрытиях всегда имеются отдельные впадины, глубина слоя воды в которых будет больше, чем на соседних выступах, что и определило наличие местных изменений глубины колеи. Из рассмотрения кривых первого участка ремонта можно сделать еще один вывод: при более тонком слое воды кривые характеризуются меньшими перепадами глубины, чем при увеличении его толщины.

На рис. 8 представлен график изменения глубины колеи во времени на седьмом участке. И в 2023-м, и в 2024 году в начале участка глубина колеи двукратно превышала глубину в его конце. Из рассмотрения продольного профиля следует, что конец участка располагался на спуске, что способствовало снижению толщины слоя жидкости. На большинстве других участков также зафиксированы изменения глубины колеи по их длине, но в несколько меньшей степени.

При сравнении кривых глубины, зафиксированных на платных дорогах (рис. 1, рис. 6), с кривыми (рис. 7, рис. 9), полученными на МКАД, обнаруживается факт отсутствия на кривых МКАД резких изменений глубины по длине дороги. Это объясняется существенной разницей в скоростях движения. На платных дорогах

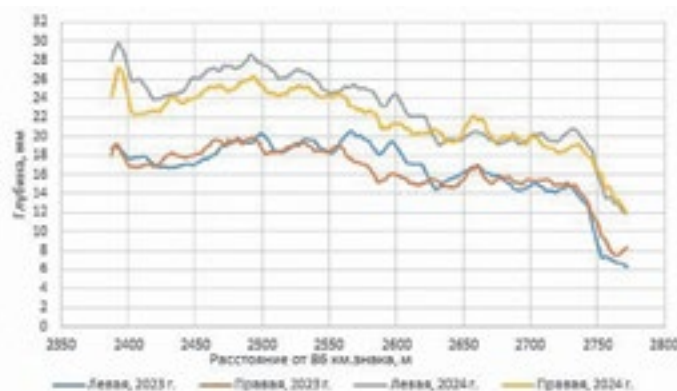


Рис. 9. Глубина колеи на седьмом участке, выполненном из материала ЩМА-16 (сера)

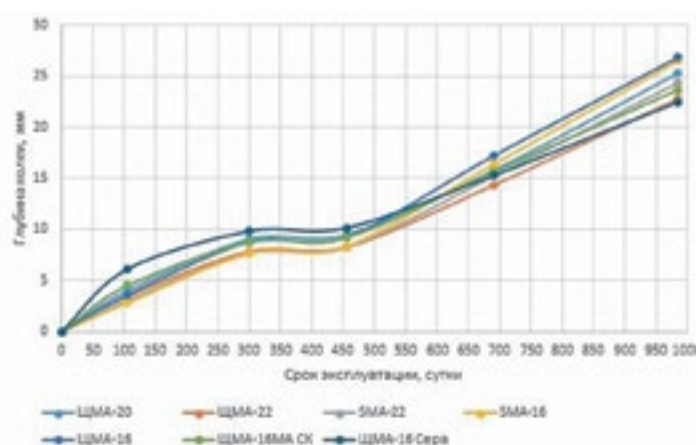


Рис. 10. График изменения глубины колеи со сроком службы на двух полосах легкового движения

вследствие более низкого уровня загрузки скорости движения очень высокие. Рост скорости приводит к увеличению площади водяного клина в контакте шины с покрытием, что способствует быстрому вымыванию вяжущего. В результате на локальных неровностях, где при осадках слой воды покрывает выступы шероховатости, за счет водяного клина возникает колея, приводящая к еще большему увеличению толщины слоя жидкости. При более низких скоростях движения площадь водяного клина в контакте существенно меньше, темп роста колеи ниже. Вода по-прежнему в процессе колееобразования играет ведущую роль, о чем свидетельствуют графики рис. 7 и рис. 9, здесь перепады также имеются, но не столь значительны, как на высокоскоростных дорогах.

На рис. 10 приведен итоговый график глубин колеи, полученный по результатам многократных измерений на опытных участках МКАД. С учетом изложенного, по полученным результатам не представляется возможным с уверенностью зафиксировать преимущества того либо иного материала, поскольку опытные участки характеризуются различными значениями параметров, влияющих на процесс колееобразования. С уверенностью можно сказать, что для снижения скорости колееобразования целесообразно увеличивать макрошероховатость покрытия, повышать его продольную ровность и стабильность поперечного уклона.

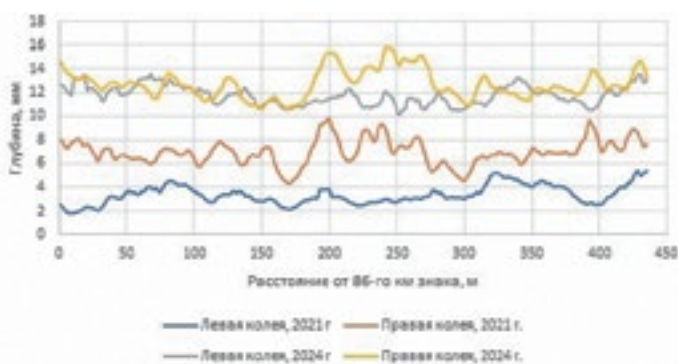


Рис. 11. Глубина колеи на первом участке, выполненном из материала ЩМА-16

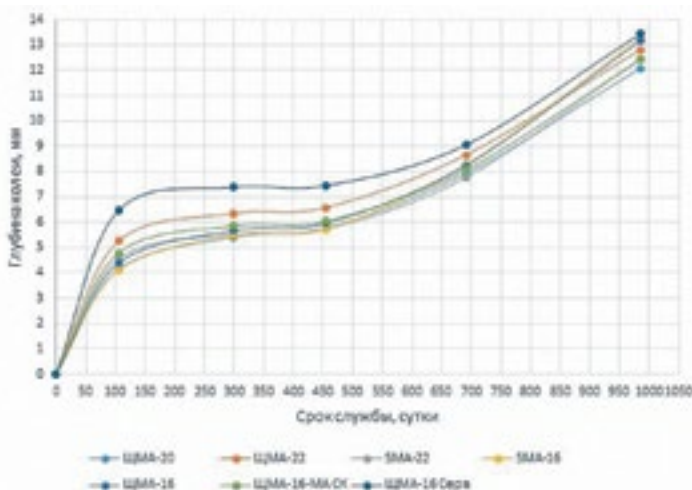


Рис. 12. График изменения глубины колеи со сроком службы на полосах грузового движения

На полосах грузового движения процесс образования колеи шел по другому сценарию. В первый же проезд, выполненный спустя всего 100 дней после устройства покрытия, была зафиксирована колея значительной глубины на всех семи опытных участках. Никакого влияния толщины слоя воды на процесс колееобразования не обнаружено (рис. 11), кривые, отображающие глубину левой и правой колеи, всегда горизонтальны. По всей видимости образование значительной по глубине колеи в первые месяцы связано с пластическими деформациями. Это подтверждается тем фактом, что правая колея на полосах грузового движения на всех участках глубже левой, что объясняется большей колесной нагрузкой за счет поперечного уклона. Небольших по длине резких увеличений глубины также на правой колее всегда больше, чем на левой, что связано с еще большим увеличением колесной нагрузки за счет влияния имеющихся на покрытии неровностей.

После первых месяцев эксплуатации рост пластических деформаций прекращается, и колея в последующие годы углубляется существенно меньшим темпом за счет износа. Однако здесь роль воды менее значима, поскольку при давлении в зоне контакта грузовых шин 0,8 Мпа водяной клин в контакт не проникает, а имеющаяся в контакте водяная пленка не вызывает размыва битумного вяжущего.

Высказанные предположения подтверждаются нашими измерениями модулей упругости на вновь построенных дорожных покрытиях. Измерения показывают, что сразу же после остывания уложенного верхнего слоя модуль основания не повышается и лишь спустя несколько суток фиксируется плавное повышение модуля за счет свежесуспенного слоя. Возникает вопрос, ответ на который имеет практическую важность, — после какого времени уложенный слой способен воспринимать современную тяжелую колесную нагрузку без пластических деформаций и в правой колее. Ответ на этот вопрос планируется получить ближайшим летом.

Итоговый график глубин колеи на полосах грузового движения приведен на рис. 12.

Измерения ровности (табл. 1) показали, что за срок службы, составивший 30,5 месяца, на полосах легкового движения ровность практически не изменилась, зафиксировано незначительное увеличение показателя IRI. Следовательно, даже появление глубокой колеи не влечет за собой изменения показателя ровности. На центральной (третьей) полосе движения показатель IRI за срок службы сохранился без изменения. На четвертой полосе зафиксировано небольшое увеличение показателя ровности — на 0,12 мм/м (ЩМА-22) и на 0,13 мм/м (ЩМА-16); на участке ЩМА-16 (сера), так же как на других участках, существенных изменений ровности не обнаружено. Наибольшие изменения ровности зафиксированы на пятой полосе движения. Здесь на всех участках зафиксировано ухудшение показателя ровности. Максимальный рост показателя IRI — на 0,22 мм/м — зафиксирован на SMA-22 и ЩМА-16. На день последних измерений наиболее ровным остается участок, выполненный из SMA-16, который сегодня характеризуется показателем ровности 1,23 мм/м. Незначительно уступает ему участок, выполненный из материала ЩМА-16 МА СК с показателем ровности 1,28 мм/м. Отмеченные участки, так же как и участок из SMA-22, обладали более высокой ровностью и при первом обследовании. Дорожные одежды, обладающие высокой прочностью, сохраняют ровность, достигнутую при строительстве, даже при наличии очень тяжелого движения. Процессы колееобразования в рядах легкового и грузового движения не сказались на показателе IRI.

ВЫВОДЫ

1. Колейность дорожного покрытия является опасным дефектом, ликвидация которого должна проводиться до превышения колеей значения глубины, допускаемого нормативной литературой. Опасность колейности усугубляется тем фактом, что водитель во время дождя оценить под слоем воды ее глубину и своевременно снизить скорость не может.
2. Темп роста глубины колеи в значительной степени определяется толщиной слоя жидкости на покрытии, в связи с этим колея может достигать опасных значений на коротких по длине участках. Исследования показывают, что в локальных местах, имеющих в ряде случаев

Таблица 1

Материал	№ участка	Полоса движ.	Ровность 09.09.2021 г.				Ровность 28.03.2024 г.			
			Левая колея IRI	Правая колея IRI	Среднее по полосе	Место	Левая колея IRI	Правая колея IRI	Среднее по полосе	Место
ЩМА-20	1	1	1,15	1,32	1,23	3	1,25	1,33	1,29	3
		2	1,43	1,38	1,40	5	1,61	1,41	1,51	7
		3	1,48	1,77	1,62	7	1,53	1,66	1,59	7
		4	2,12	1,48	1,80	6	2,11	1,60	1,86	6
		5	1,38	1,26	1,32	6	1,49	1,42	1,46	6
		Среднее	1,51	1,44	1,48	6	1,60	1,48	1,54	6
ЩМА-22	2	1	1,33	1,59	1,46	7	1,38	1,45	1,41	7
		2	1,22	1,50	1,36	4	1,23	1,52	1,38	4
		3	1,35	1,76	1,55	6	1,34	1,63	1,49	6
		4	2,21	1,92	2,06	7	2,03	1,85	1,94	7
		5	1,74	1,56	1,65	7	1,77	1,66	1,71	7
		Среднее	1,57	1,66	1,62	7	1,55	1,62	1,59	7
SMA-22	3	1	1,27	1,51	1,39	6	1,36	1,45	1,40	6
		2	1,06	1,15	1,11	1	1,30	1,42	1,36	3
		3	1,28	1,25	1,27	3	1,16	1,17	1,16	1
		4	1,33	1,25	1,29	2	1,37	1,24	1,31	2
		5	1,24	1,17	1,203	5	1,56	1,30	1,43	5
		Среднее	1,24	1,27	1,25	2	1,35	1,31	1,33	3
SMA-16	4	1	1,15	1,15	1,15	1	1,32	1,22	1,27	2
		2	1,25	1,15	1,20	2	1,43	1,19	1,31	2
		3	1,09	1,11	1,10	1	1,25	1,23	1,24	2
		4	1,19	1,13	1,16	1	1,30	1,19	1,24	1
		5	1,03	0,93	0,98	1	1,15	1,04	1,09	1
		Среднее	1,14	1,09	1,12	1	1,29	1,17	1,23	1
ЩМА-16	5	1	1,24	1,30	1,27	4	1,33	1,39	1,36	5
		2	1,42	1,43	1,42	6	1,42	1,43	1,43	5
		3	1,32	1,51	1,42	5	1,33	1,60	1,47	5
		4	1,62	1,43	1,52	4	1,78	1,65	1,71	5
		5	1,34	1,05	1,195	4	1,53	1,29	1,41	4
		Среднее	1,39	1,34	1,36	4	1,48	1,47	1,47	5
ЩМА16-МА-СК	6	1	1,17	1,26	1,22	2	1,17	1,20	1,19	1
		2	1,23	1,31	1,27	3	1,11	1,24	1,18	1
		3	1,23	1,38	1,30	4	1,25	1,38	1,31	3
		4	1,47	1,40	1,43	3	1,53	1,50	1,52	3
		5	1,30	0,90	1,10	2	1,34	1,05	1,20	2
		Среднее	1,28	1,25	1,27	3	1,28	1,27	1,28	2
ЩМА16-Сера	7	1	1,20	1,56	1,38	5	1,30	1,41	1,35	4
		2	1,22	1,78	1,50	7	1,39	1,61	1,50	6
		3	1,02	1,51	1,26	2	1,15	1,59	1,37	4
		4	1,59	1,69	1,64	5	1,68	1,58	1,63	4
		5	1,16	1,13	1,14	3	1,34	1,14	1,24	3
		Среднее	1,24	1,53	1,39	5	1,37	1,46	1,42	4

протяженность всего несколько метров, колея может расти в разы быстрее, чем на прилегающих участках дороги.

3. Небольшая по протяженности, но глубокая колея представляет угрозу для быстро движущегося автомобиля во время дождя. В этом случае особую опасность представляет колея, значительно отличающаяся глубиной на левой и правой полосах наката, поскольку из-за различной глубины воды возникает момент, способный сместить автомобиль с полосы движения. В связи с этим колею необходимо оценивать по наибольшему значению глубины, зафиксированному на левой либо на правой полосе наката.

4. При выполнении ремонта необходимо стремиться достичь максимально возможную стабильность поперечного уклона и минимально возможные показатели IRI. Нужно учитывать тот факт, что даже в пределах значений, допустимых нормативной литературой, нестабильность поперечного уклона и увеличение показателя ровности при осадках, а также во время применения для борьбы с зимней скользкостью жидких реагентов приводят к образованию на дорожной поверхности слоев жидкости различной толщины, что ускоряет образование колеи.

5. По результатам измерений колеи на полосах легкового движения оценить сопротивляемость материалов

образованию колеи невозможно, поскольку участки отличаются уклонами продольного профиля и значениями показателей ровности, достигнутыми при строительстве.

6. На полосах грузового движения образование значительной по глубине колеи зафиксировано после первых месяцев эксплуатации по причине пластических деформаций. Существенных преимуществ какого-либо материала не выявлено.

Кузнецов Ю. В., к. т. н.; Моисеенко Д. А., зав. лабораторией МАДИ; Гавриленко А. А., аспирант МАДИ; Пуркина И. А., аспирант МАДИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кузнецов Ю. В., Моисеенко Д. А., Кузнецов В. А., Пуркина И. А. Результаты мониторинга опытных участков дорожных покрытий на МКАД // Автомобильные дороги. — № 3. — 2023.
2. Кузнецов Ю. В. Причины образования колеи на левых полосах автомагистралей и пути снижения интенсивности колеобразования // Сборник научных трудов МАДИ (ГТУ). Проектирование автомобильных дорог. — Москва. — 2007. — С. 6.