

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-03>

УДК: 625.768.5

МРНТИ: 73.31.43

Влияние уплотненного прибордюрного наноса на кромочное разрушение асфальтобетонного покрытия и долговечность дорожной одежды***¹ Касымов А., ² Ходжабеков М.**¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан² Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени Мирзо Улугбека, Самарканд, Узбекистан*Автор-корреспондент e-mail: kasymovashat5@gmail.com

Поступила: Февраль 02, 2026 Рецензирование: Март 05, 2026 Принята в печать: Сентябрь 15, 2026	Аннотация В статье установлено количественное влияние накопления уплотнённого прибордюрного наноса на кромочное разрушение асфальтобетонного покрытия и долговечность дорожной одежды. На основе вторичного анализа данных натурных исследований восьми участков улично-дорожной сети г. Алматы (зимний сезон 2024-2025 гг.) и математического моделирования показано, что стационарная масса наноса 160-360 г/м ² в прибордюрной полосе 0-0,5 м создаёт зону застоя рассолов противогололёдных материалов, ускоряющую стриппинг вяжущего, морозное пучение и коррозию бортовых камней. Разработана модель, связывающая массу наноса, концентрацию хлорид-ионов у кромки и скорость её деградации; установлено сокращение межремонтного срока службы кромки с 10 до 4,1 года при отсутствии очистки. Обосновано, что механизированная очистка прибордюрной зоны специализированным навесным модулем восстанавливает ресурс кромки до 9,3 года, обеспечивает предотвращённый ущерб 2,45 млн тенге на 1 км в год и коэффициент «выгода–затраты» свыше 5. Результаты формируют технико-экономическое обоснование внедрения специализированного навесного оборудования и актуализации нормативных требований к содержанию прибордюрной зоны. Ключевые слова: прибордюрная зона; дорожный нанос; кромочное разрушение; стриппинг; противогололёдные материалы; долговечность дорожной одежды; механизированная очистка
Касымов Асхат	Информация об авторах: Докторант по профилю, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан ORCID ID: 0009-0000-7483-5180 E-mail: kasymovashat5@gmail.com
Ходжабеков Мураджон	Кандидат физико-математических наук, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени Мирзо Улугбека, Самарканд, Узбекистан ORCID ID: 0000-0003-3771-7091 E-mail: uzedu@inbox.ru

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-03>

ӘОЖ: 625.768.5

ҒТАМР: 73.31.43

Тығыздалған жиектасты жол наносының асфальтбетон жабындасы шеткі бөлігінің бұзылуына және жол киімінің ұзақ мерзімділігіне әсері***¹ Касымов А., ² Ходжабеков М.**¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан² Миро Улугбек атындағы Самарканд мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Самарканд, Өзбекстан*Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): kasymovashat5@gmail.com

Мақала келді: Ақпан 02, 2026 Сараптамадан өтті: Наурыз 05, 2026 Қабылданды: Қыркүйек 15, 2026	Түйіндеме Мақалада жиектасты аймақта тығыздалған жол наносының жиналуының асфальт-бетон жабындасының шеткі бөлігінің бұзылуына және жол киімінің ұзақ мерзімділігіне сандық әсері белгіленді. Алматы қаласының көше-жол желісіндегі сегіз учаскеде жүргізілген табиғи зерттеулер деректерінің қайталама талдауы мен математикалық модельдеу негізінде жиектасты жолақтағы 160-360 г/м² стационарлық нанос массасы қарсы тайғанау материалдарының тұзды ерітінділерінің тоқырау аймағын қалыптастыратыны, бұл битумның стриппингін, мороздық көтерілу мен бордюр тастарының коррозиясын жылдамдататыны көрсетілді. Нанос массасын, шеткі аймақтағы хлорид-иондарының концентрациясын және оның деградация жылдамдығын байланыстыратын модель әзірленді; тазалау болмаған жағдайда шеткі бөліктің жөндеуаралық қызмет мерзімі 10 жылдан 4,1 жылға дейін қысқарады. Механизацияланған тазалау шеткі бөліктің ресурсын 9,3 жылға дейін қалпына келтіретіні, жылына 1 км-ге 2,45 млн теңге алдын ала шығынды және 5-тен жоғары «пайда–шығын» коэффициентін қамтамасыз ететіні негізделді. Түйін сөздер: жиектасты аймақ; жол наносы; шеткі бөліктің бұзылуы; стриппинг; қарсы тайғанау материалдары; жол киімінің ұзақ мерзімділігі; механизацияланған тазалау
Касымов Асхат	Авторлар туралы ақпарат: Бейіндік докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан ORCID ID: 0009-0000-7483-5180 E-mail: kasymovashat5@gmail.com
Ходжабеков Мураджон	Физика-математика ғылымдарының кандидаты, Миро Улугбек атындағы Самарканд мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Самарканд, Өзбекстан ORCID ID: 0000-0003-3771-7091 E-mail: uzedu@inbox.ru

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-03>

UDC: 625.768.5

IRSTI: 73.31.43

Impact of compacted curb-zone deposits on edge degradation of asphalt concrete pavement and road structure durability***¹ Kassymov A., ² Khodjabekov M.**¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan² Samarkand State Architectural and Civil Engineering University, Samarkand, Uzbekistan*Corresponding author e-mail: kasymovashat5@gmail.com

Received: February 02, 2026 Under review: March 05, 2026 Accepted for publication: September 15, 2026	Abstract The article quantifies the impact of accumulated compacted curb-zone deposits on edge degradation of asphalt concrete pavement and road structure durability. Secondary analysis of field data from eight urban road sections in Almaty (winter 2024-2025) combined with mathematical modeling shows that a stationary deposit mass of 160-360 g/m² within the 0-0.5 m curb strip creates a stagnation zone of de-icing brines that accelerates binder stripping, frost heave, and curb stone corrosion. A model linking deposit mass, chloride concentration at the pavement edge, and edge degradation rate was developed; the edge service life decreases from 10 to 4.1 years without cleaning. Mechanized curb-zone cleaning with a specialized attachment module restores the edge resource to 9.3 years, provides prevented damage of 2.45 million tenge per km per year and a benefit–cost ratio above 5. The results form a technical-economic basis for introducing specialized attachment equipment and updating maintenance standards for the curb zone. Keywords: curb zone; road deposit; edge degradation; stripping; de-icing materials; road structure durability; mechanized cleaning
Kassymov Askhat	Information about authors: Professional Doctorate Candidate, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan ORCID ID: 0009-0000-7483-5180 E-mail: kasymovashat5@gmail.com
Khodjabekov Muradjon	Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Samarkand State Architectural and Civil Engineering University, Samarkand, Uzbekistan ORCID ID: 0000-0003-3771-7091 E-mail: uzedu@inbox.ru

1. Введение

Загрязнение атмосферного воздуха взвешенными частицами остаётся одним из приоритетных факторов риска для здоровья городского населения: по оценке Всемирной организации здравоохранения, с ним связана преждевременная смертность порядка 7 млн человек в год [1]. По мере ужесточения норм на выхлопные выбросы возрастает относительный вклад невыбросных источников (Non-Exhaust Emissions): износа покрытия, шин, тормозных систем и ресуспензии осевшей пыли, достигающий 50-60 % суммарной массы частиц PM10 [2, 3].

Ключевую роль в накоплении загрязнений играет бортовой камень: методами вычислительной гидродинамики доказано, что вертикальный бордюр высотой 15-20 см формирует зону «аэродинамического запираания» с коэффициентом накопления $K_{\text{canyon}} \approx 1,8$, вследствие чего стационарная масса загрязнений в прибордюрной полосе 0-0,5 м достигает 160-360 г/м² даже при регулярной вакуумной уборке [4]. В зимний период смет пропитывается рассолами хлоридных противогололёдных материалов (ПГМ), смерзается в конгломерат, а при таянии образует зону длительного контакта агрессивных растворов с кромкой покрытия и гранью бордюра; при этом, как показано в [4], основная масса рассолов мигрирует в нижележащие слои дорожной одежды и водоотводные лотки.

В то время как экологические аспекты воздействия ПГМ изучены достаточно полно [5, 6], а эффективность технологий уборки оценивается преимущественно по показателям ресуспензии [3, 7], количественная связь между массой прибордюрного наноса и скоростью кромочного разрушения покрытия до настоящего времени не установлена. Существующие модели [4] рассматривают покрытие в целом, не выделяя прибордюрную полосу как зону концентрированного воздействия; машинно-ориентированные исследования ограничиваются основным полотном [8, 9] либо щётчными органами без учёта деградации инфраструктуры [10-12], а единственная работа по прибордюрной зоне [13] рассматривает летний грунтовой нанос без учёта зимнего конгломерата и его агрессивности к дорожной одежде.

Цель работы - расчётно-аналитическое обоснование влияния уплотнённого прибордюрного наноса на скорость кромочного разрушения асфальтобетонного покрытия и долговечность дорожной одежды, а также количественная оценка эффекта механизированной очистки прибордюрной зоны.

Задачи: (1) систематизировать механизмы деградации кромки покрытия при застое рассолов; (2) разработать модель связи массы наноса, концентрации хлоридов и скорости деградации кромки; (3) выполнить прогноз срока службы кромки для сценариев содержания; (4) оценить предотвращённый ущерб и экономическую эффективность механизированной очистки.

2. Материалы и методы

Исследование выполнено расчётно-аналитическим методом на основе вторичного анализа: (а) данных натурных наблюдений на 8 участках УДС г. Алматы в зимний сезон 2024-2025 гг., включая гидрохимические пробы снежного покрова и фотофиксацию прикромочной зоны [4]; (б) нормативных документов по содержанию дорог и бортовым камням [15]; (в) литературных данных по стриппингу и коррозии под воздействием хлоридов [14]. Полевые эксперименты на данной стадии не проводились; верификация модели запланирована на весенний сезон 2027 г.

Объект воздействия - уплотнённый прибордюрный нанос: конгломерат «смёт+лёд+рассолы ПГМ», сезонные состояния которого классифицированы сведены в таблицу 1; расчётными (наиболее агрессивными к покрытию) являются состояния S1 и S3.

Таблица 1. Сезонные состояния прибордюрного наноса и их агрессивность к кромке покрытия

Состояние	Характеристика	Период	Агрессивность к кромке
S1	Мёрзлый конгломерат, макс. концентрация рассолов	Ноябрь-март	Высокая (химическая)
S2	Влажный уплотнённый нанос, оттепель	Март-апрель	Максимальная (химическая + морозное пучение)
S3	Сухая твёрдая корка	Апрель-май	Умеренная (абразивная, ресуспензия)
S4	Рыхлый смет летнего накопления	Июнь-октябрь	Низкая

Модель деградации кромки. Концентрация хлорид-ионов у кромки покрытия принимается пропорциональной массе наноса, удерживающего рассолы, с учётом аэродинамического накопления:

$$C_{cl} = k_c \frac{M_{st} \cdot K_{canyon}}{w_k} \quad (1)$$

где $k_c=0,20$ - коэффициент переноса хлоридов в поверхностный слой плотного асфальтобетона; M_{st} - стационарная масса наноса, г/м²; $K_{canyon}=1,8$ [4]; $w_k=0,4$ м - ширина прибордюрной полосы. Скорость деградации кромки описывается степенной зависимостью по аналогии с моделью коррозионного износа покрытия [4, 14] с поправками на морозное и абразивное воздействие:

$$\theta_{edge} = \alpha \cdot C_{cl}^n \cdot k_{frost} \cdot k_{abr} \quad (2)$$

где $\alpha=0,012$ мм/год·(мг/л)⁻ⁿ; $n=0,7$; $k_{frost}=1,5$ (120-150 циклов замораживания-оттаивания за сезон [4]); $k_{abr}=1,2$. Прогноз межремонтного срока службы кромки:

$$T_k = \frac{T_0 \cdot \theta_{crit}}{\theta_{edge}} \quad (3)$$

где $T_0=10$ лет [15]; $\theta_{crit}=0,15$ мм/год. Предотвращённый ущерб от продления срока службы кромки на 1 км оценивается по модели жизненного цикла (LCCA):

$$E_{repair} = \frac{C_{repair}}{T_{base}} - \frac{C_{repair}}{T_{adapt}} \quad (4)$$

где $C_{repair}=18,0$ млн тенге/км (фрезерование, укладка, замена бортовых камней); T_{base} и T_{adapt} - сроки службы кромки без очистки и при механизированной очистке.

3. Результаты

3.1. Накопление наноса и застой рассолов у кромки

Расчёт по модели баланса массы [4] для условий магистральной УДС Алматы (N=1800 авт/ч) даёт стационарные массы загрязнений, приведённые в таблице 2: даже вакуумная уборка оставляет в прибордюрной полосе 160 г/м², тогда как щёточная - 360 г/м², то есть в 2-3 раза выше порога, при котором застой рассолов становится существенным фактором деградации.

Таблица 2. Стационарная масса загрязнений по технологиям содержания (по данным [4])

Технология	Коэффициент удаления η , 1/ч	M_{st} , г/м ²	Снижение к «без уборки»
Без уборки	0	1440	0%
Механическая (щёточная)	0,045	360	75,0%

Технология	Коэффициент удаления η , 1/ч	M_{st} , г/м ²	Снижение к «без уборки»
Вакуумная	0,120	160	88,9%
Гидродинамическая мойка	0,180	110	92,4%

Совокупность механизмов деградации кромки, инициируемых застоем рассолов, схематизирована на рисунке 1: стриппинг вяжущего, морозное пучение основания, коррозия бортовых камней и абразивный износ кромки образуют взаимосвязанный контур, ускоримый циклами замораживания-оттаивания состояний S1-S2 (таблица 1).



Рисунок 1. Схема механизмов деградации кромки асфальтобетонного покрытия при накоплении прибордюрного наноса [материал автора]

Натурное состояние кромки подтверждает схему рисунка 1: на рисунке 2 приведена фотофиксация характерных повреждений - выкрашивание асфальтобетона у бортового камня, кристаллизация хлоридов на стенках лотка и слежавшийся конгломерат у основания бордюра, что согласуется с гидрохимическими аномалиями (рН до 9,1) на участках с застоем реагентов [4].



Рисунок 2. Повреждения кромки покрытия и элементов обустройства в прибордюрной зоне УДС г. Алматы: а - выкрашивание асфальтобетона (стриппинг); б - солевой налёт на стенках лотка; в - слежавшийся конгломерат у основания бордюра [материалы автора].

3.2. Модель скорости деградации кромки и прогноз срока службы

Расчёт по формулам (1)-(3) для трёх сценариев содержания прибордюрной зоны сведён в таблицу 3: при отсутствии очистки скорость деградации кромки достигает 0,32 мм/год, что сокращает межремонтный срок с нормативных 10 лет до 4,1 года; механизированная очистка модулем [16] снижает θ_{edge} до 0,07 мм/год и восстанавливает ресурс до 9,3 года.

Таблица 3. Расчёт скорости деградации кромки и срока её службы по сценариям содержания

Сценарий	M_{st} , г/м ²	C_{CB} , мг/л	θ_{edge} , мм/год	T_k , лет
Без очистки прибордюрной зоны	360	291,6	0,32	4,1
Ручная очистка (удаление 50%)	180	145,8	0,21	6,5
Механизированная очистка (удаление 90%)	36	29,2	0,07	9,3

Зависимость θ_{edge} от массы наноса, иллюстрирующая нелинейный (степенной) характер роста деградации и эффект очистки, представлена на рисунке 3: снижение M_{st} с 360 до 36 г/м² уменьшает скорость деградации в 4,6 раза.

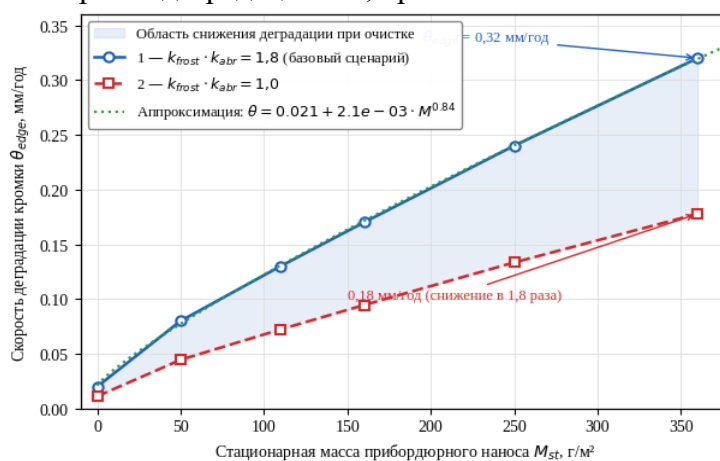


Рисунок 3. Зависимость скорости деградации кромки покрытия от стационарной массы прибордюрного наноса [материал автора]

Интегральный прогноз остаточного ресурса кромки во времени для трёх сценариев (таблица 3) показан на рисунке 4: пересечение порога критического состояния (20% ресурса) происходит на 4-5-й год без очистки, на 6-7-й год при ручном труде и на 9-10-й год при механизированной очистке, что и даёт выигрыш 2-4 года, заявленный в аннотации.

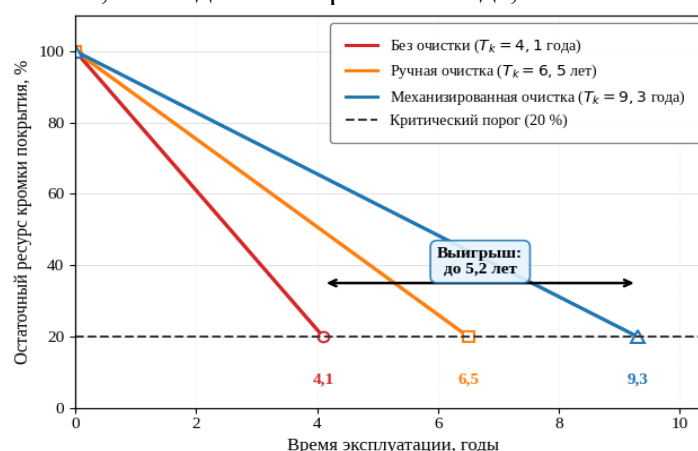


Рисунок 4. Прогноз остаточного ресурса кромки асфальтобетонного покрытия при различных технологиях содержания прибордюрной зоны [материал автора]

Сезонная неравномерность агрессивного воздействия, следующая из классификации таблицы 1, представлена на рисунке 5: пик индекса агрессивности приходится на февраль-апрель (состояния S1-S2), что определяет оптимальное окно механизированной очистки - до начала высыхания конгломерата (S3).

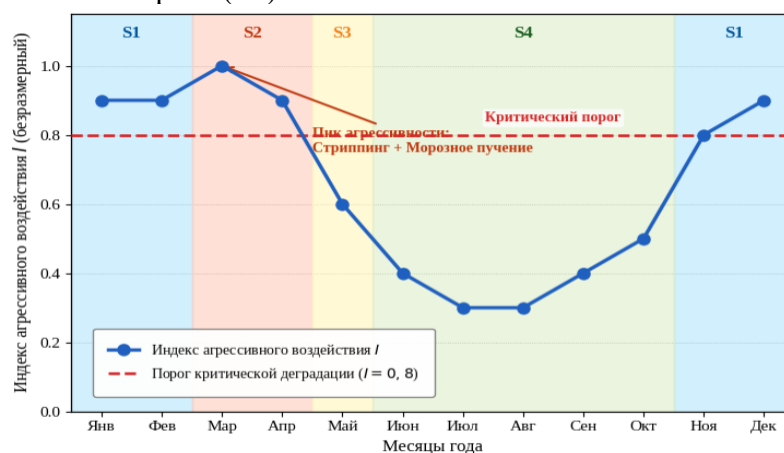


Рисунок 5. Сезонная динамика индекса агрессивного воздействия прибордюрного наноса на кромку покрытия [материал автора]

3.3. Экономическая оценка механизированной очистки

Сравнение технологий очистки прибордюрной зоны по производительности, полноте удаления наноса и воздействию на инфраструктуру приведено в таблице 4: только специализированный навесной модуль [16] совмещает высокую производительность (2000-4000 пог. м/ч), полноту удаления 85-90% и защиту бордюра, тогда как щёточные машины в прибордюрной полосе удаляют лишь 15-25% наноса, а мойка ограничена сезоном и стоком рассолов.

Таблица 4. Сравнительная характеристика технологий очистки прибордюрной зоны

Технология	Производительность	Удаление наноса у бордюра	Воздействие на инфраструктуру
Ручной труд	10-20 пог. м/ч	40-60%	Точечные повреждения кромки
Щёточная машина	800-1200 пог. м/ч	15-25%	Абразивный износ; рост silt loading полотна [5]
Гидродинамическая мойка	500-800 пог. м/ч	40-60%	Миграция рассолов в лотки и основание [4]
Навесной модуль [16]	2000-4000 пог. м/ч	85-90%	Защищено (копирование бордюра, ограничение усилия)

Расчёт по формуле (4) даёт предотвращённый ущерб $E_{\text{repair}} = 18,0/4,1 - 18,0/9,3 = 2,45$ млн тенге на 1 км прибордюрной полосы в год; сводные показатели эффективности, включая затраты на очистку и коэффициент «выгода-затраты» (BCR), приведены в таблице 5, а сопоставление затрат и кумулятивной экономии за 10 лет - на рисунке 6: окупаемость модуля достигается за 1-2 сезона преимущественно за счёт отложенных ремонтов кромки, а не за счёт экономии на самой уборке.

Таблица 5. Сводные показатели экономической эффективности (на 1 км прибордюрной полосы, год)

Показатель	Без очистки	Механизированная очистка
Срок службы кромки T_k , лет	4,1	9,3
Приведённые затраты на ремонт, млн тенге	4,39	1,94
Затраты на очистку, млн тенге	0,80 (ручной труд)	0,40
Чистый эффект, млн тенге	-5,19	+2,05
Коэффициент BCR	0,15	5,1

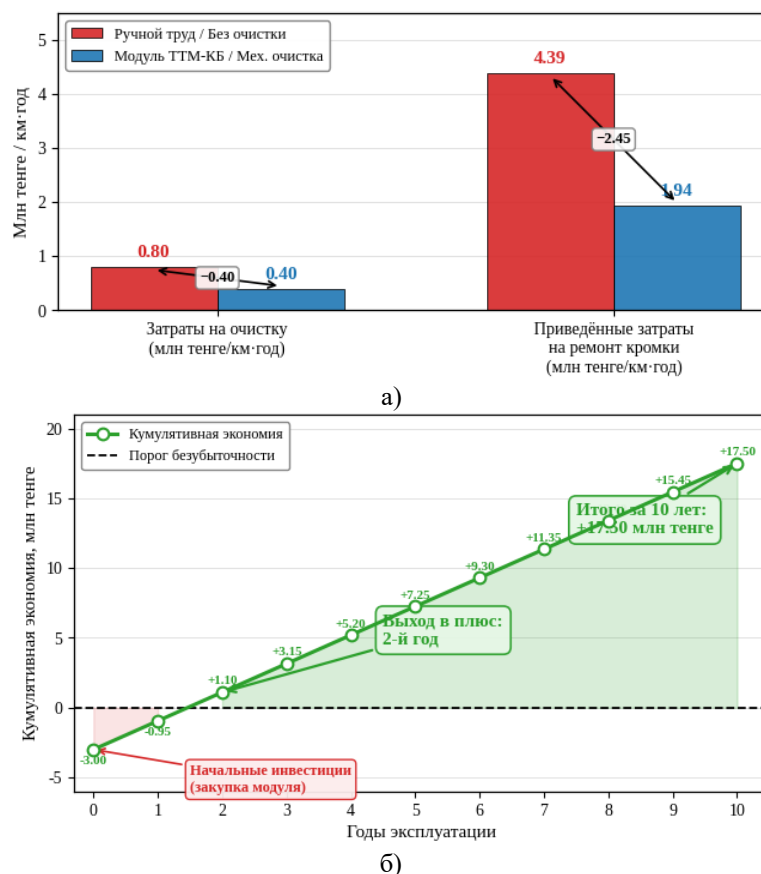


Рисунок 6. Сравнительная экономика содержания прибордюрной зоны: затраты на очистку и ремонты кромки и кумулятивная экономия за 10 лет: а – сравнение годовых затрат (отчистка и ремонт кромки); б – динамика кумулятивной экономии с учетом начальных инвестиций. [материал автора]

Структура предотвращённого ущерба, детализирующая результат таблицы 5, представлена на рисунке 7: доминирующим компонентом (40%) является стриппинг асфальтобетона, далее - коррозия и замена бортовых камней (20%) и морозное пучение основания (15%), что подтверждает корректность фокуса модели (1)-(3) именно на химико-механических механизмах.

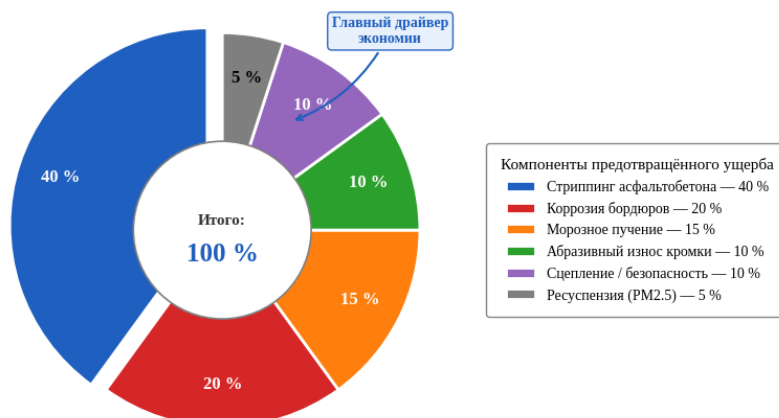


Рисунок 7. Структура предотвращённого ущерба от механизированной очистки прибордюрной зоны [материал автора]

4. Обсуждение

Полученные результаты согласуются с выводом о том, что сухое подметание лотковой зоны не только малоэффективно, но и способно увеличивать пылевую нагрузку

полотна [5], и с данными о преимущественном удалении крупных фракций вакуумными машинами [8, 9]: ни одна из серийных технологий не обеспечивает удаления уплотнённого конгломерата из прибордюрной полосы, вследствие чего застой рассолов и деградация кромки продолжают даже при «нормативном» содержании [15]. Выявленная нелинейность зависимости (2) означает, что экологически мотивированное снижение M_{st} [4, 6, 7] даёт непропорционально большой выигрыш по долговечности: уменьшение массы наноса вдвое снижает скорость деградации кромки примерно на 38%. В отличие от работы [13], рассматривавшей фрезерование летнего грунтового наноса, настоящая модель учитывает зимний конгломерат и его агрессивность к дорожной одежде, а технологическим средством реализации рекомендаций выступает навесной транспортно-технологический модуль с вакуумным захватом и защитой бордюра [16]. Ограничением исследования является расчётный характер коэффициентов k_c , k_{frost} , k_{abr} ; их уточнение запланировано на основе полевых измерений весеннего сезона 2027 г. Практический выход: включение в технологические карты весеннего содержания обязательной механизированной очистки прибордюрной полосы в окне февраль-апрель (рисунок 5) с критерием приёма $M_{st} \leq 40$ г/м² и актуализация соответствующих требований СТ РК 1412-2017 [15].

5. Заключение

1. Систематизированы четыре механизма кромочного разрушения покрытия при застое рассолов ПГМ в прибордюрном наносе; показано, что накопление наноса 160-360 г/м² повышает их интенсивность в 1,3-4 раза (таблица 1, рисунки 1, 2).
2. Разработана модель (1)-(3), связывающая массу наноса, концентрацию хлоридов у кромки и скорость её деградации; установлено сокращение межремонтного срока службы кромки с 10 до 4,1 года при отсутствии очистки (таблица 3, рисунки 3, 4).
3. Обосновано оптимальное окно очистки (февраль-апрель, состояния S1-S2) и критерий приёма $M_{st} \leq 40$ г/м² (рисунок 5).
4. Количественно оценён эффект механизированной очистки: предотвращённый ущерб 2,45 млн тенге/км·год, чистый эффект +2,05 млн тенге/км·год, BCR=5,1, окупаемость 1-2 сезона (таблицы 4, 5; рисунки 6, 7).
5. Результаты формируют технико-экономическое обоснование внедрения специализированного навесного оборудования [16] в практику содержания УДС и базу для актуализации нормативных требований к очистке прибордюрной зоны.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Касымов А., Ходжабеков М. Влияние уплотнённого прибордюрного наноса на кромочное разрушение асфальтобетонного покрытия и долговечность дорожной одежды // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyryn Khabarshysy. 2026; 3(15): 14-25. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-03>

Cite this article as: Kassymov A., Khodjabekov M. Impact of compacted curb-zone deposits on edge degradation of asphalt concrete pavement and road structure durability [Vliyaniye uplotnennogo pribordyurnogo nanosa na kromochnoye razrusheniye asfal'tobetonnoy pokrytiya i dolgovechnost' dorozhnoy odezhdy]. Vestnik Kazakhskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyryn Khabarshysy. 2026; 3(15): 14-25. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-03>

Литература

1. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. 290 p. ISBN 978-92-4-003422-8.
2. Piscitello A., Bianco C., Casasso A., Sethi R. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of the Total Environment*. 2021;766:144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>

3. Amato F., Querol X., Johansson C., Nagl C., Alastuey A. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods. *Science of the Total Environment*. 2010;408(16):3070–3084. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.025>
4. Doré G., Konrad J.-M., Roy M. Role of Deicing Salt in Pavement Deterioration by Frost Action. *Transportation Research Record*. 1997;1596(1). <https://doi.org/10.3141/1596-11>
5. Gustafsson M., Blomqvist G., Dahl A., Ljungman A., Norman M. Modelling road dust emission abatement measures using the NORTRIP model: Vehicle speed and studded tyre reduction. *Atmospheric Environment*. 2016;134:96–108. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.035>
6. Das S., Wiseman C.L.S. Examining the effectiveness of municipal street sweeping in removing road-deposited particles and metal(loid)s of respiratory health concern. *Environment International*. 2024;187:108697. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108697>
7. Lin S.-L., Deng Y., Lin M.-Y., et al. Do the Street Sweeping and Washing Work for Reducing the Near-ground Levels of Fine Particulate Matter and Related Pollutants? *Aerosol and Air Quality Research*. 2023;23:220338. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220338>
8. Wu B., Men J., Chen J. Numerical study on particle removal performance of pickup head for a street vacuum sweeper. *Powder Technology*. 2010;200(1–2):16–24. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.001>
9. Fayzullayevich J.V., Tan G.F., Alex F.J., Wu Y., Agyeman P.K. Numerical Study of Factors Affecting Particle Suction Efficiency of Pick-Up Head of a Regenerative Air Vacuum Sweeper. *Processes*. 2022;10(7):1252. <https://doi.org/10.3390/pr10071252>
10. Vanegas-Useche L.V., Abdel Wahab M.M., Parker G.A. Effectiveness of oscillatory gutter brushes in removing street sweeping waste. *Waste Management*. 2015;43:28–36. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.014>
11. Zhang Y.-C., Yang C.-Z., Baker C., Chen M., Zou X., Dai W.-L. Effects of expanding zone parameters of vacuum dust suction mouth on flow simulation results. *Journal of Central South University*. 2014;21(6):2547–2552. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2210-2>
12. Pan J., Ye J., Ai H., Wang J., Wan Y. Parameter optimization of a pure electric sweeper dust port by a backpropagation neural network combined with a whale algorithm. *Mechanical Sciences*. 2023;14:47–60. <https://doi.org/10.5194/ms-14-47-2023>
13. Спиридонов В.В. Обоснование выбора рациональных геометрических параметров и режимов работы рабочего органа машины для очистки прибордюрных зон городских дорог: дис. ... канд. техн. наук. Омск; 2007. 166 с.
14. Fay L., Shi X. Environmental Impacts of Chemicals for Snow and Ice Control: State of the Knowledge. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2012;223(5):2751–2770. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-1064-6>
15. СТ РК 1412-2017. Содержание автомобильных дорог общего пользования. Общие требования. Комитет технического регулирования и метрологии МИР РК, Астана, 2017.
16. Performance Deterioration of Asphalt Mixture under Chloride Salt Erosion. *Materials*. 2021;14(12):3339. <https://doi.org/10.3390/ma14123339>

References

1. World Health Organization. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization; 2021. 290 p. ISBN 978-92-4-003422-8.
2. Piscitello A., Bianco C., Casasso A., Sethi R. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of the Total Environment*. 2021;766:144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>
3. Amato F., Querol X., Johansson C., Nagl C., Alastuey A. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods. *Science of the Total Environment*. 2010;408(16):3070–3084. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.025>

4. Doré G., Konrad J.-M., Roy M. Role of deicing salt in pavement deterioration by frost action. *Transportation Research Record*. 1997;1596(1):70–75. <https://doi.org/10.3141/1596-11>
5. Gustafsson M., Blomqvist G., Dahl A., Ljungman A., Norman M. Modelling road dust emission abatement measures using the NORTRIP model: Vehicle speed and studded tyre reduction. *Atmospheric Environment*. 2016;134:96–108. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.035>
6. Das S., Wiseman C.L.S. Examining the effectiveness of municipal street sweeping in removing road-deposited particles and metal(loid)s of respiratory health concern. *Environment International*. 2024;187:108697. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108697>
7. Lin S.-L., Deng Y., Lin M.-Y., et al. Do the street sweeping and washing work for reducing the near-ground levels of fine particulate matter and related pollutants? *Aerosol and Air Quality Research*. 2023;23:220338. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220338>
8. Wu B., Men J., Chen J. Numerical study on particle removal performance of pickup head for a street vacuum sweeper. *Powder Technology*. 2010;200(1–2):16–24. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.001>
9. Fayzullayevich J.V., Tan G.F., Alex F.J., Wu Y., Agyeman P.K. Numerical study of factors affecting particle suction efficiency of pick-up head of a regenerative air vacuum sweeper. *Processes*. 2022;10(7):1252. <https://doi.org/10.3390/pr10071252>
10. Vanegas-Useche L.V., Abdel Wahab M.M., Parker G.A. Effectiveness of oscillatory gutter brushes in removing street sweeping waste. *Waste Management*. 2015;43:28–36. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.014>
11. Zhang Y.-C., Yang C.-Z., Baker C., Chen M., Zou X., Dai W.-L. Effects of expanding zone parameters of vacuum dust suction mouth on flow simulation results. *Journal of Central South University*. 2014;21(6):2547–2552. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2210-2>
12. Pan J., Ye J., Ai H., Wang J., Wan Y. Parameter optimization of a pure electric sweeper dust port by a backpropagation neural network combined with a whale algorithm. *Mechanical Sciences*. 2023;14:47–60. <https://doi.org/10.5194/ms-14-47-2023>
13. Spiridonov V.V. *Obosnovanie vybora ratsionalnykh geometricheskikh parametrov i rezhimov raboty rabocheho organa mashiny dlya ochistki pribordyurnykh zon gorodskikh dorog* [Justification of the selection of rational geometric parameters and operating modes of the working body of a machine for cleaning curbside zones of urban roads]: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Omsk; 2007. 166 p.
14. Fay L., Shi X. Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: State of the knowledge. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2012;223(5):2751–2770. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-1064-6>
15. ST RK 1412-2017. *Soderzhanie avtomobilnykh dorog obshchego polzovaniya. Obshchie trebovaniya* [Maintenance of public roads. General requirements]. Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Investments and Development of the Republic of Kazakhstan. Astana; 2017.
16. Wang F., Qin X., Pang W., Wang W. Performance deterioration of asphalt mixture under chloride salt erosion. *Materials*. 2021;14(12):3339. <https://doi.org/10.3390/ma14123339>