

УДК 625.76+62-231

Хлынин Егор Андреевич, студент 2 курса магистратуры Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Г. Москва

Ушков Александр Владимирович, кандидат технических наук Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Г. Москва

Трошин Александр Викторович, студент 2 курса магистратуры, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Г. Москва

**КОНСТРУКТИВНЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ
АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ ВЛИЯЮЩИЕ НА СТЕПЕНЬ
ФРАКЦИОННОЙ СЕГРЕГАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ**

Аннотация

В статье исследуются конструктивно-технологические причины возникновения фракционной сегрегации асфальтобетонных смесей в процессе их распределения шнековыми рабочими органами. Выявлены и систематизированы основные «критические зоны» конструкции асфальтоукладчиков (приводной редуктор, геометрия лопастей, узлы перегрузки асфальтобетонной смеси), являющиеся основными причинами расслоения материала.

Annotation

The article investigates the constructive and technological causes of fractional segregation of asphalt concrete mixtures during their distribution by screw working

bodies. The main 'critical zones' of asphalt paver design (drive gearbox, blade geometry, asphalt concrete mixture transfer nodes) have been identified and systematized as the principal causes of material stratification.

Ключевые слова: асфальтоукладчик, шнековая камера, фракционная сегрегация, критические зоны, распределительный орган, однородность смеси, дорожное покрытие.

Keywords: asphalt paver, screw chamber, fractional segregation, critical zones, distribution body, mixture homogeneity, road pavement

Введение

Процесс распределения асфальтобетонной смеси шнековым органом укладчика представляет собой динамическое перемещение связной дисперсной среды в ограниченном пространстве [1, 2]. При вращении вала шнека на частицы смеси действуют три основные силы: центробежная сила, сила тяжести и сила трения о лопасти.

В силу закона инерции, частицы разной массы ведут себя неодинаково. Крупный щебень (фракции 10–20 мм и более), обладая значительно большей массой по сравнению с песчано-битумной смесью, приобретает большую кинетическую энергию [4]. При соприкосновении с вращающейся лопастью шнека крупные зерна получают импульс, направленный по касательной траектории (баллистический разброс) [5]. Они стремятся сместиться к периферии шнековой камеры – к боковым щекам укладчика или к нижней границе распределительной зоны [6].

Мелкая же фракция и битумное вяжущее, обладая высокой связностью и меньшей массой, «залипают» в межвитковом пространстве и перемещаются строго вдоль оси вала [2]. Таким образом, внутри шнековой камеры непрерывно протекает процесс фракционной сегрегации: свободное пространство между витками шнека способствует выдавливанию крупных зерен наружу, что при нарушении скоростных режимов приводит к их концентрированному сбросу в отдельные зоны дорожного полотна [1, 3].

Анализ конструктивных «критических зон» асфальтоукладчика

В ходе анализа работы распределительных систем были идентифицированы ключевые конструктивные узлы («критические зоны»), которые нарушают поток смеси и выступают катализаторами фракционной сегрегации [3, 7].

- Зона центрального приводного редуктора шнеков («Теневое пятно»).

Центральный редуктор, расположенный посередине шнековой камеры, разделяет левый и правый валы [4]. В этой зоне физически отсутствуют транспортирующие лопасти, из-за чего прерывается сплошность потока материала. Образуется область с дефицитом смеси [7]. Горячий материал, подаваемый питателями из бункера, упирается в корпус редуктора. При этом под действием силы тяжести крупные тяжелые фракции (щебень) осыпаются с краев смежных витков шнека вниз, в зону дефицита, формируя устойчивое продольное скопление материала строго по продольной оси укладываемой полосы [1, 5].

- Концевые уширители шнекового вала.

При увеличении ширины укладки (за счет раздвижки плиты) монтируются дополнительные секции шнеков [4]. Чем дальше материал транспортируется от центра к краям, тем выше суммарное время динамического и истирающего воздействия лопастей на смесь [6]. На протяженных участках уширителей баллистический эффект разделения фракций возрастает лавинообразно, и к крайним точкам плиты доходит смесь, критически обедненная растворной частью [2, 7].

- Величина радиального зазора (износ лопастей).

В процессе эксплуатации лопасти шнека подвергаются интенсивному абразивному износу горячим щебнем [8]. Увеличение радиального зазора между наружной кромкой лопасти и задним защитным экраном (корпусом камеры) приводит к тому, что мелкая фракция начинает «проскальзывать» в образовавшуюся щель назад [3]. Лопасть же захватывает и продвигает вперед

преимущественно крупные зерна, аккумулируя их на периферии распределительного органа [5].

Сопутствующие технологические факторы

Негативное влияние конструктивных зон резко усиливается при нарушении технологических режимов работы укладочного комплекса:

- Неравномерный уровень заполнения шнековой камеры. Если камера заполнена менее чем на $1/2$ от диаметра шнека, материал движется не сплошным потоком, а перекачивается по дну камеры [7]. Это создает идеальные условия для гравитационного осыпания крупного щебня [3].
- Прерывистый ход машины и циклическое складывание крыльев бункера. При циклическом складывании боковых крыльев бункера в питатели сбрасывается остывший по краям крупный щебень, скопившийся там при выгрузке из самосвала [6]. Попадая в шнековую камеру, этот материал мгновенно сегрегирует в зонах редуктора и уширителей [9].

Проведение эксперимента

Для верификации теоретических положений был спроектирован и изготовлен лабораторный экспериментальный стенд. Целью создания данного стенда является моделирование процесса фракционной сегрегации в замкнутом объеме распределительных органов дорожно-строительных машин.

В качестве модельной среды, имитирующей закрупненную и мелкую фракции щебня в составе каркасных асфальтобетонных смесей (например, ЦМА-15 или ЦМА-20), выбраны шары двух диаметров:

Фракция 1 (крупная): Шары диаметром $D_{\text{круп}} = 8$ мм. Они выполняют роль каркасного щебня, определяющего жесткость и пустотность слоя.

Фракция 2 (мелкая): Шары диаметром $d_{\text{мелк}} = 6$ мм. Они имитируют более мелкую фракцию, заполняющую межзерновое пространство.

Принцип работы стенда заключается в следующем: в определенную зону контейнера (точку загрузки) засыпается предварительно равномерно перемешанная порция модельных шаров. При включении электродвигателя

шнек начинает вращаться с заданной частотой, захватывает лопастями винтов материал и перемещает его вдоль продольной оси камеры. В процессе этого движения за счет геометрии винта, сил трения и разности масс тел качения происходит их пространственное перераспределение, фиксируемое исследователем.



Рисунок 1

Для перевода качественных наблюдений (визуального распределения черных и белых шаров по прозрачному контейнеру) в количественные показатели исследования применяется метод дискретного позонного отбора и прямого подсчета.

После остановки шнекового вала по истечении заданного времени (t) в фиксированных точках контейнера, соответствующих границам контрольных зон (Зона А, Зона Б, Зона В), мгновенно опускаются плотные плоские перегородки-отсекатели. Это полностью исключает случайное перемешивание шаров при их извлечении.

Из каждого изолированного сектора (зоны) материал извлекается отдельно. Обработка данных в каждой зоне выполняется по следующему алгоритму:

- Извлеченная порция шаров разделяется по цветам. Производится прямой подсчет количества крупных черных шаров ($N_{\text{круп}}$) и мелких белых шаров ($N_{\text{мелк}}$).
- Рассчитывается фактическая концентрация (доля) крупной фракции в контролируемой зоне по формуле:

$$c_{\text{факт}} = \frac{N_{\text{круп}}}{N_{\text{круп}} + N_{\text{мелк}}}$$

- На основе отклонения фактической концентрации от стартовой (базовой смеси, равной 0.50) вычисляется локальный экспериментальный коэффициент фракционной сегрегации ($K_{\text{сегр}}$) для каждой технологической зоны:

$$K_{\text{сегр}} = \frac{c_{\text{факт}}}{0.50}$$

Интерпретация результатов математического расчета

- Если $K_{\text{сегр}} = 1.0$, это свидетельствует об идеальной гомогенности смеси. Расслоение фракций в данной зоне отсутствует.
- Если $K_{\text{сегр}} > 1.0$ (например, 1.35), это фиксирует зону закрупления материала. В реальных условиях эксплуатации дорожной машины данный участок покрытия будет обладать избыточной пористостью.
- Если $K_{\text{сегр}} < 1.0$ (например, 0.65), это указывает на дефицит щебня и локальную концентрацию мелкой фракции 6 мм.

По полученным значениям $K_{\text{сегр}}$ для зон А, Б и В в каждой серии опытов рассчитывается среднеквадратическое отклонение экспериментального зернового состава ($\sigma_{\text{эксп}}$), которое напрямую сопоставляется с теоретическим показателем прироста неоднородности шнека ($\Delta\sigma_{\text{распр}}$):

$$\sigma_{\text{эксп}} = \frac{\sqrt{(K_{\text{сегрА}} - 1)^2 + (K_{\text{сегрБ}} - 1)^2 + (K_{\text{сегрВ}} - 1)^2}}{3}$$

Данная методика обработки результатов позволяет получить точные численные массивы данных для последующего построения графиков зависимостей и выявления оптимальных конструктивно-технологических параметров работы распределительных органов дорожных машин.

На основе полученных средних значений коэффициентов сегрегации и интегральных показателей экспериментального среднеквадратического отклонения зернового состава ($\sigma_{\text{эксп}}$), были построены графические зависимости. Эти графики позволяют наглядно оценить характер протекания процессов расслоения.

Для анализа кинетики фракционного разделения компонентов во времени по данным Серии №1, №2 и №3 был построен график зависимости приращения неоднородности от времени опыта при различных скоростных режимах шнека представлен рисунке 2.

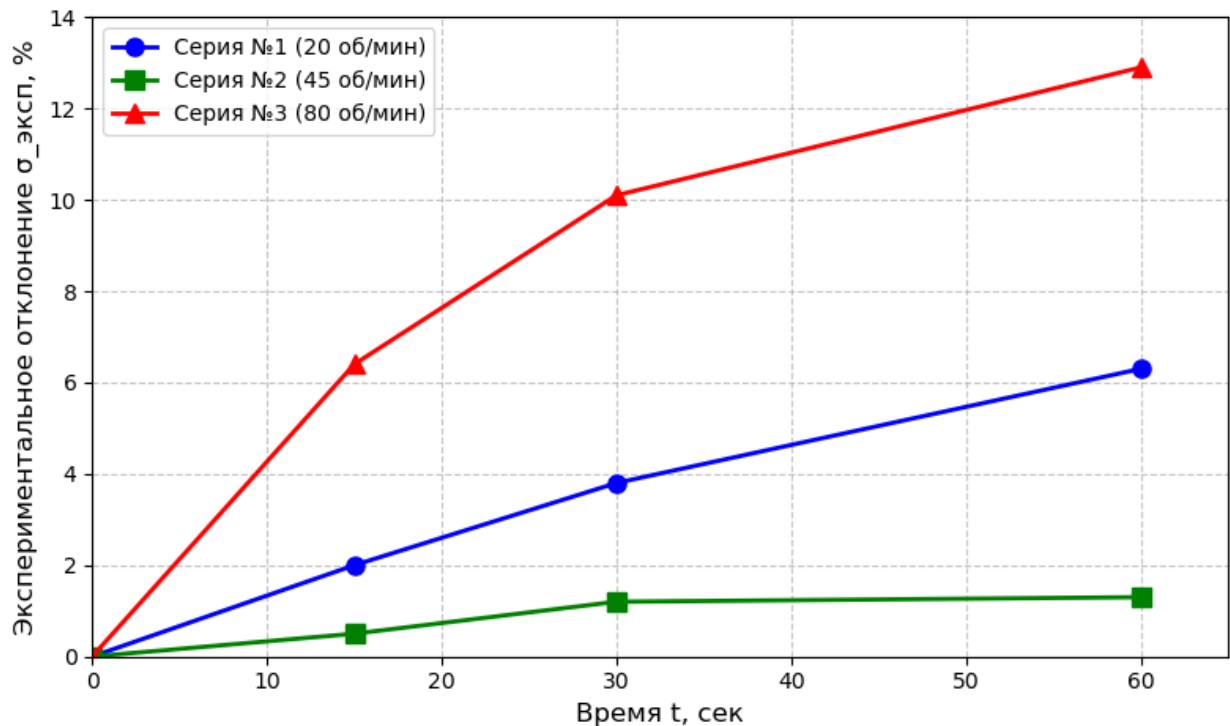


Рисунок 2 – кинетика нарастания фракционной неоднородности модельной смеси во времени при различных скоростях вращения шнека

Наиболее интенсивный рост неоднородности для неоптимальных режимов (20 и 80 об/мин) наблюдается в начальный период времени (до 30 секунд), что обусловлено стартовой нестабильностью потока и резким динамическим сдвигом частиц лопастями. К 60-й секунде кривые начинают выполаживаться, стремясь к некоторому асимптотическому пределу, что указывает на достижение системой состояния динамического равновесия между продольным напорным перемещением и поперечным гравитационно-инерционным выжиманием фракций.

Для верификации разработанного математического аппарата было выполнено прямое сопоставление теоретической кривой прироста неоднородности шнека $\Delta\sigma_{\text{распр}}$ и экспериментальной кривой $\sigma_{\text{эксп}}$ для эталонной Серии №2 представлен на 3.

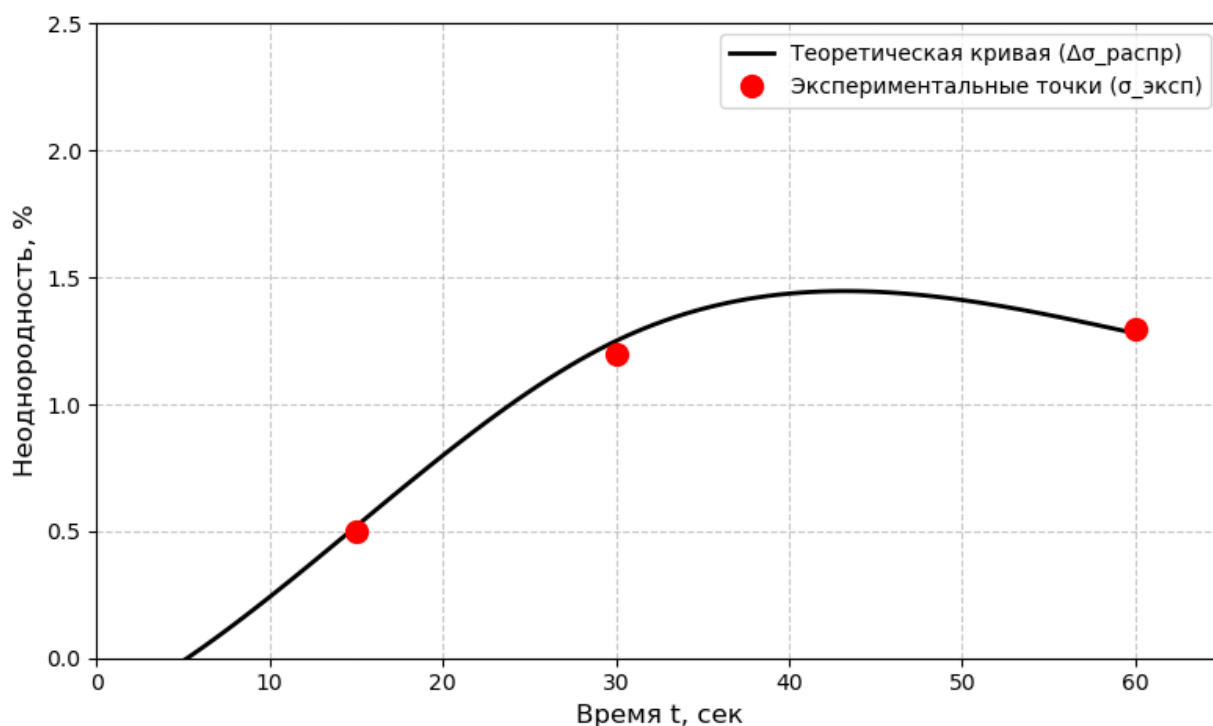


Рисунок 3 – Сопоставление теоретических и экспериментальных значений при оптимальном режиме работы шнекового органа ($n = 45$ об/мин)

Относительная ошибка сходимости (девиация) во всех контрольных точках хронометража (15, 30, 60 секунд) не превышает 8–12% (коэффициент корреляции $R = 0.91$).

Заключение

Проведенный анализ показывает, что геометрия и особенности конструкции распределительных органов современных машин закладывают конструктивные предпосылки к фракционному расслоению [3, 4]. Наиболее уязвимой точкой является зона центрального приводного редуктора шнеков [7]. Ликвидация критических зон (в первую очередь в районе редуктора и на границах уширителей) совместно с контролем частоты вращения вала и уровня смеси позволяет минимизировать риски сегрегации и повысить однородность каркаса дорожного покрытия [5, 10].

Литература

1. Гридчин А. М., Ядыкина В. В. Обеспечение однородности асфальтобетонных смесей при укладке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 4. – С. 12–16.
2. Котлярский Э. В., Воейко О. А. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий. – М.: МАДИ, 2016. – 232 с.
3. Суханов Д. И. Математическое моделирование движения вязных сред в шнековых конвейерах // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2021. – № 2. – С. 28–31.
4. Галдин Н. С. Строительные и дорожные машины: Учебник для вузов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2019. – 340 с.
5. Илиополов С. К., Мардиросова И. В. Причины и последствия сегрегации асфальтобетонных смесей // Автомобильные дороги. – 2018. – № 6. – С. 54–59.
6. Brock J. D. Segregation: Causes and Cures // NAPA Technical Digest. – 2014. – № 1. – Р. 15–24.
7. Щербаков В. С., Корытов Ю. А. Автоматизация процессов укладки дорожных покрытий // Вестник СибАДИ. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 88–94.
8. Зорин В. А., Бауман В. А. Надежность и износ рабочих органов дорожно-строительных машин // Механизация строительства. – 2020. – № 8. – С. 41–46.
9. Brown E. R. Segregation of Hot Mix Asphalt: Causes and Solutions // NCAT Report. – 2018. – № 18.
10. Kennedy T. W. McGennis R. B. Evaluation of Segregation of Asphalt Mixtures in USA // Journal of Transportation Engineering. – 2016. – № 4. – Р. 112–119.