

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168 : 666.9.013

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89

Опытно-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси

Д.В. Герасимов^{1,*}, А.А. Игнатьев²

Денис Владимирович Герасимов*

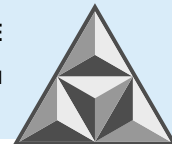
¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*geras930@mail.ru**

Игнатьев Алексей Александрович

²ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Российская Федерация

alexassis@ya.ru



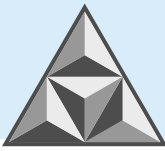
Описаны результаты расчета опытно-промышленной линии производства гранулированной асфальтобетонной смеси с включением в состав фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата. Предложен метод смешивания компонентов асфальтобетонной смеси – гранулирование окатыванием. Подобраны производственные узлы опытно-промышленной линии, даны рекомендации по минимально-допустимым эксплуатационным характеристикам оборудования. Разработан краткий технологический регламент производства продукции, определена энерго- и ресурсоемкость производства, что позволило рассчитать потребность в кадровых ресурсах, средствах механизации и определить стоимость целевого материала. Представленные данные являются исчерпывающими для составления технического задания на проектирование опытно-промышленной линии производства, определения ее стоимостных параметров, что дает возможность всесторонне охарактеризовать разработанный дорожный материал как с точки зрения уровня технико-эксплуатационных показателей, так и с экономических позиций. Расширены представления о способах производства асфальтобетонных смесей и сырьевой базе дорожного строительства.

Ключевые слова: гранулированная асфальтобетонная смесь, окатывание, фосфогипс, вторичный полиэтилентерефталат, асфальтобетонный завод

Для цитирования:

Герасимов Д.В., Игнатъев А.А. Опытно-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 75-89.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89

Pilot production line for granulated asphalt concrete mix production

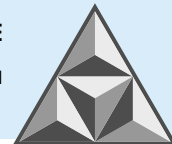
D.V. Gerasimov^{1,*}, A.A. Ignatyev²

Denis Vladimirovich Gerasimov*

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
*geras930@mail.ru**

Aleksey Aleksandrovich Ignatyev

²Russian Road Research Institute, Moscow, Russian Federation
alexassis@ya.ru



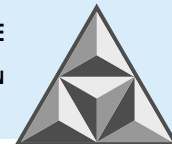
The paper presents the results of calculation of a pilot production line for granulated asphalt concrete mixture with inclusion of phosphogypsum and secondary polyethylene terephthalate. The authors propose a method of mixing asphalt mixture components by pelletising. The authors selected the production units of the pilot line, gave recommendations on the minimum permissible technical and operational characteristics of the equipment. The authors have developed a brief technological regulation of production, energy and resource intensity of production was determined. In addition, it allowed them to calculate the need for human resources, means of mechanisation and determine the cost characteristics of the target material. The presented data are quite complete for drawing up the terms of reference for designing a pilot production line and determining its cost parameters. This makes it possible to comprehensively characterise the developed road material both from the point of view of the level of technical and operational indicators and from the economic point of view. The paper expands the understanding of the methods of production of asphalt concrete mixtures and the raw material base of road construction.

Keywords: granulated asphalt concrete mix, pelletising, phosphogypsum, secondary polyethylene terephthalate, asphalt mixing plant

For citation:

Gerasimov D.V., Ignatyev A.A. Pilot production line for granulated asphalt concrete mix production // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 75-89.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89



ВВЕДЕНИЕ

Разработка любого материала для дорожного строительства является комплексной задачей [1]. Корреляционные зависимости состава и целевых свойств, полученные в ходе математического моделирования, а также обоснование физико-химических процессов структурообразования окажутся бесполезны, если отсутствует возможность промышленного производства. Опираясь на объемы разработок в лабораторных условиях, проблематично с высокой точностью определить стоимость дорожного материала. В условиях рыночной экономики превосходство технико-эксплуатационных его характеристик над аналогами может оказаться недостаточным, так как в цепи «цена – качество» первый фактор очень часто превалирует.

Одностадийный переход от лабораторной стадии производства материала к предсерийному прототипу и промышленному образцу порой неосуществим по ряду причин [2, 3], среди которых отметим:

- отсутствие возможности масштабирования (увеличения размеров узлов и агрегатов) ввиду существенного конструктивного различия лабораторного и производственного оборудования, что влечет за собой необходимость отладки процесса при ином аппаратурном исполнении;

- отсутствие данных о точных технико-эксплуатационных характеристиках производственных узлов и агрегатов промышленного типа требует крупномасштабных доработок дорогостоящего полногабаритного оборудования параллельно с ходом производственного процесса или полной его приостановкой на длительный срок.

Последствия финансовых и репутационных рисков в случае одностадийного перехода многократно возрастают. Как правило, требуется организовать опытно-промышленное производство [4]. Для опытно-промышленной линии обычно необходимо использование промышленных образцов оборудования, но с учетом минимизации габаритов и уровня производительности.

Основными задачами создания опытно-промышленной линии производства строительного дорожного материала являются [4]:

- отладка технологических процессов изготовления дорожного материала с преимущественно механизированной производственной цепочкой на промышленном оборудовании и допуском ручного вмешательства с целью снижения затрат на дорогостоящие узлы, несущественно влияющие на общую производительность и качество конечного продукта;

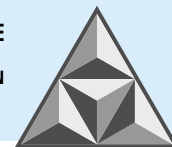
- получение достаточного количества материала для полноценной его апробации в полевых условиях в обстановке рыночной конкуренции;

- сбор и анализ данных об удельных затратах труда, энергетических, финансовых, материальных и прочих ресурсов на производство единицы продукции;

- обоснование совместимости узлов применяемого оборудования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В Ярославском государственном техническом университете с 2019 года ведется разработка нового композиционного материала для дорожного строительства – гранулированной асфальтобетонной смеси (ГАБС), в состав которой включены промышленные и бытовые отходы – фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат (рис. 1). Этот материал и технология



его получения защищены патентами Российской Федерации № 2701007 [5] и № 2762177 [6]. Отличительной особенностью материала, помимо использования в составе фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата, является предложенный в [5, 6] подход к смешиванию компонентов – гранулирование окатыванием. Применение дорожного материала оказывается возможным как в холодном (20°C), так и горячем состоянии (120°C) без изменения его компонентного состава (см. табл. 1).



Рис. 1. Гранулированная асфальтобетонная смесь
Fig. 1. Granulated asphalt concrete mixture

Таблица 1. Компонентный состав гранулированной асфальтобетонной смеси

Table 1. Component composition of granulated asphalt concrete mixture

Структурный элемент / наименование материала	Содержание от общей массы смеси, %
Крупный каменный заполнитель / щебень габбро-диабаз фр. 5-8 мм по ГОСТ 32703-2014	58.7
Мелкодисперсный заполнитель / фосфогипс типа Б по ТУ 2141-693-00209438-2015	31.3
Модифицированное вторичным полиэтилентерефталатом битумное вяжущее на основе БНД 60/90 по ГОСТ 22249-90 (10% ПЭТФ от общей массы вяжущего)	10.0

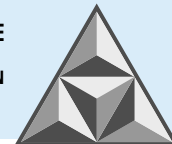
Смесь в холодном состоянии не проявляет склонности к сегрегации и слеживаемости, может храниться и транспортироваться в негерметичной таре, что в совокупности с прогнозируемой стоимостью является конкурентным преимуществом в сравнении с традиционными холодными асфальтобетонными смесями.

При условии успешного внедрения указанные особенности позволяют судить о возможности расширения сырьевой базы производства асфальтобетонных смесей, с попутным извлечением пользы за счет утилизации указанных отходов безвредным для окружающей среды способом, а также о расширении теоретических представлений о способах смешивания компонентов асфальтобетонных смесей.

Разработка гранулированной асфальтобетонной смеси – поэтапный процесс; теоретические и экспериментальные результаты, полученные в ходе исследований, представлены циклом публикаций [7-10]. Однако технологические аспекты требуют дополнительной углубленной проработки. Руководствуясь определенными на предыдущих этапах исследования технологическими параметрами процесса изготовления дорожного материала, сформулирована цель – разработка научно-обоснованного технологического решения производства гранулированной асфальтобетонной смеси (ГАБС) в опытно-промышленных условиях, на основе чего появляется возможность определить ее основные технико-экономические параметры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать современный опыт производства асфальтобетонных смесей и возможные пути модернизации асфальтобетонных заводов;
- провести анализ рынка производственного оборудования для получения асфальтобетонных смесей и их компонентов, определить узлы и агрегаты



опытно-промышленной линии, представить рекомендации по минимально допустимым технико-эксплуатационным характеристикам аппаратов;

– разработать основы технологического регламента производства ГАБС, оценить энерго- и ресурсоемкость производства, потребность в средствах механизации для получения качественного дорожного материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НАУКОМЕТРИЧЕСКИХ БАЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ наукометрических баз показал высокую публикационную активность по результатам изысканий, описывающим особенности определения рациональных рецептурных и технологических параметров процесса получения материалов-аналогов, физико-химических процессов их структурообразования, но исключительно в лабораторных условиях. Однако в рамках настоящего исследования интерес представляют именно технологические аспекты – механизированная подготовка сырья для дорожного строительства (сушка, фракционирование, дозирование и т.д.), процессы смешивания компонентов асфальтобетонных смесей, автоматизация циклов, процессы фасовки и отгрузки готового продукта. Данные задачи, кроме проектирования и строительства дорог, являются предметом интереса и других научных специальностей, в частности, 2.6.13 «Процессы и аппараты химических технологий» и 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», то есть находятся «на стыке» как минимум трех специальностей.

Интерес научного сообщества к решению прикладных задач в области дорожного строительства на данный момент довольно слабый и в основном заключается не в поиске принципиально новых технологических решений, а в модернизации и оптимизации существующих технологий за счет следующих факторов:

– повышение качественных характеристик асфальтобетонных смесей и сырьевых материалов путем их модифицирования и получения полимерных битумных вяжущих (ПБВ), в том числе с включением полимерных бытовых отходов [11-13];

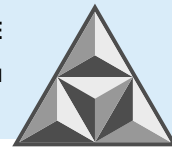
– снижение негативного влияния таких смесей на окружающую среду [14, 15];

– снижение производственных издержек и повышение качества продукции за счет автоматизации производственных процессов, внедрения Искусственного Интеллекта (AI) и Интернета Вещей (IoT) [16-18];

– регенерация асфальтобетонных смесей по горячей технологии на заводе [19, 20].

По результатам анализа публикаций можно заключить:

а) Отрасль производства асфальтобетонных смесей весьма консервативна, но поступательно эволюционирует. Качественный прорыв с существенным улучшением характеристик продукции, расширением сырьевой базы, снижением затрат и повышением экологичности производства за последние 10-20 лет не зафиксирован. Однако описанные целевые показатели неуклонно улучшаются. Для большинства базовых операций технологического цикла (хранение/погрузка/транспортировка, дробление, рассев и сушка минеральных материалов, дозирование, смешивание компонентов, фасовка/погрузка готовой продукции) используется традиционное оборудование, которое базируется на принципах, выработанных более 100 лет назад. В конструктивном исполнении преобладает модульная компоновка, включающая блоки подготовки крупного и мелкого минерального заполнителя с



системами сушки, обеспыливания и дозирования, блок подготовки органического вяжущего, асфальтосмесительную установку, блок хранения и фасовки готовой продукции. Большинство инновационных решений по изменению устройства узлов и агрегатов технологического цикла связано с производством модифицированных битумных вяжущих, поскольку практика введения полимерных модификаторов достаточно нова, а модификаторы отличаются разнообразием. Активность внедрения модификаторов на основе полимерных бытовых отходов интенсифицирует процесс развития установок и способов производства ПБВ. Использование подобного сырья, нетипичного для отрасли, влечет за собой необходимость разработки узлов и установок, основанных на новых принципах.

б) Наибольшим потенциалом обладают разработки в сфере автоматизации и внедрения информационных технологий (AI, IoT и т.д.). Именно они в краткосрочной перспективе способны привести к революции в производстве асфальтобетонных смесей. Однако данное направление разработок может привести к усложнению и росту стоимости работ при внедрении нового материала в производство на начальных стадиях.

Возможность производства ГАБС на стандартно укомплектованном асфальтобетонном заводе исключена. Поскольку по грубым подсчетам, около 25% узлов необходимо заменить (блок асфальтосмесительной установки), примерно 45% – модернизировать (блок подготовки модифицированного вяжущего, блок подготовки мелкого минерального заполнителя – фосфогипса и блок фасовки готовой продукции) и около 15% процентов – необходимо перереконструировать.

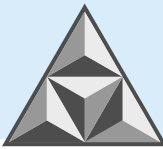
В ходе проектирования опытно-промышленной линии производства ГАБС важно руководствоваться следующими принципами:

- приоритет использования для производства асфальтобетонных смесей типовых узлов и агрегатов отечественного производства;
- приоритет использования максимально возможной доли механизированных и автоматизированных технологических операций;
- возможность внедрения в технологический процесс ручных операций допускается, но не в ущерб производительности и качеству конечной продукции;
- подбор узлов и агрегатов необходимо вести на основе принципов совместимости и рационального соотношения «цена – габариты – производительность» как для отдельного узла и агрегата, так и для линии производства дорожно-строительных материалов (ДСМ).

Опытно-промышленную линию необходимо поделить на пять блоков:

- три блока подготовки сырьевых компонентов – крупного и мелкого минерального заполнителя, а также модифицированного битумного вяжущего;
- блок гранулирования материала;
- блок фасовки ГАБС.

Определены конкретные марки узлов и агрегатов опытно-промышленной линии. Основным является блок гранулирования материала. В качестве приоритетной выбрана тарельчатая конструкция гранулятора «Т-150М» производства «Дзержинсктехномаш». В результате договоренностей с производителем установлена возможность его доукомплектации термоизолированной рубашкой с технологическими отверстиями для введения основных компонентов материала. Подогрев тарели предусмотрен газовой горелкой «КП-25Б». Расчетная часовая производительность блока – 1 т продукции при четырех циклах грануляции по 250 кг.



На рис. 2 представлен блок подготовки крупного каменного заполнителя.

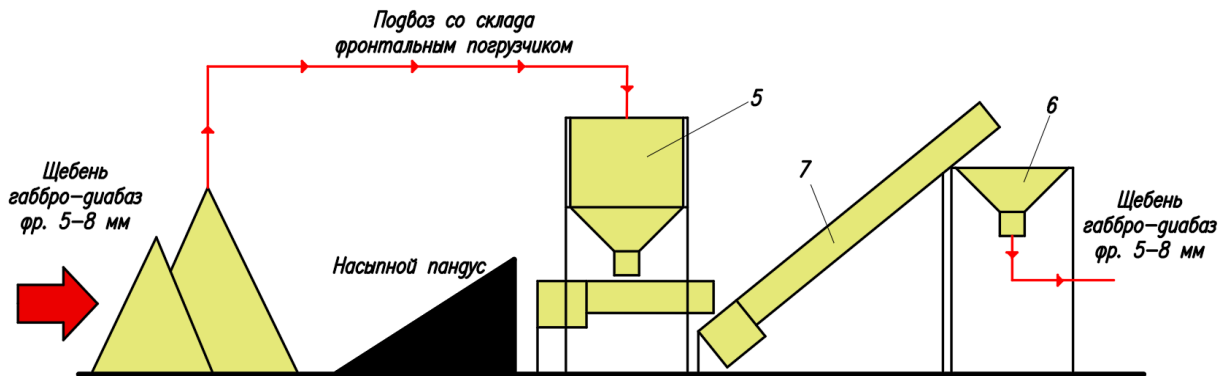


Рис. 2. Блок подготовки крупного каменного заполнителя

Fig. 2. Coarse aggregate preparation unit

Отметим отдельно, что цифры на рис. 2-5 представлены не по порядку, а в соответствии с нумерацией, данной на общей технологической схеме.

Щебень складировать на складе дорожно-строительных материалов производственного комплекса площадью 147.6 м² для обеспечения бесперебойной работы опытно-промышленной линии на протяжении 21 рабочей смены.

Щебень один раз в смену (8 ч) грузят фронтальным погрузчиком по насыпному пандусу ($h = 1.5$ м) в бункер хранения инертных материалов с ленточным питателем БП-ЛП (поз. 5). Затем при открытии шиберной заслонки и включении вибропобудителя он попадает на питатель ЛК-С-Ж-Ш-500-6000-219-НФ-NMRV075 (поз. 7), установленный под углом 30°, и поднимается на высоту 4.0 м в весовой бункер-дозатор (поз. 6) до заполнения его одной порцией щебня, необходимой для грануляции ($m = 149.6$ кг).

На рис. 3 представлен блок подготовки мелкого минерального заполнителя.

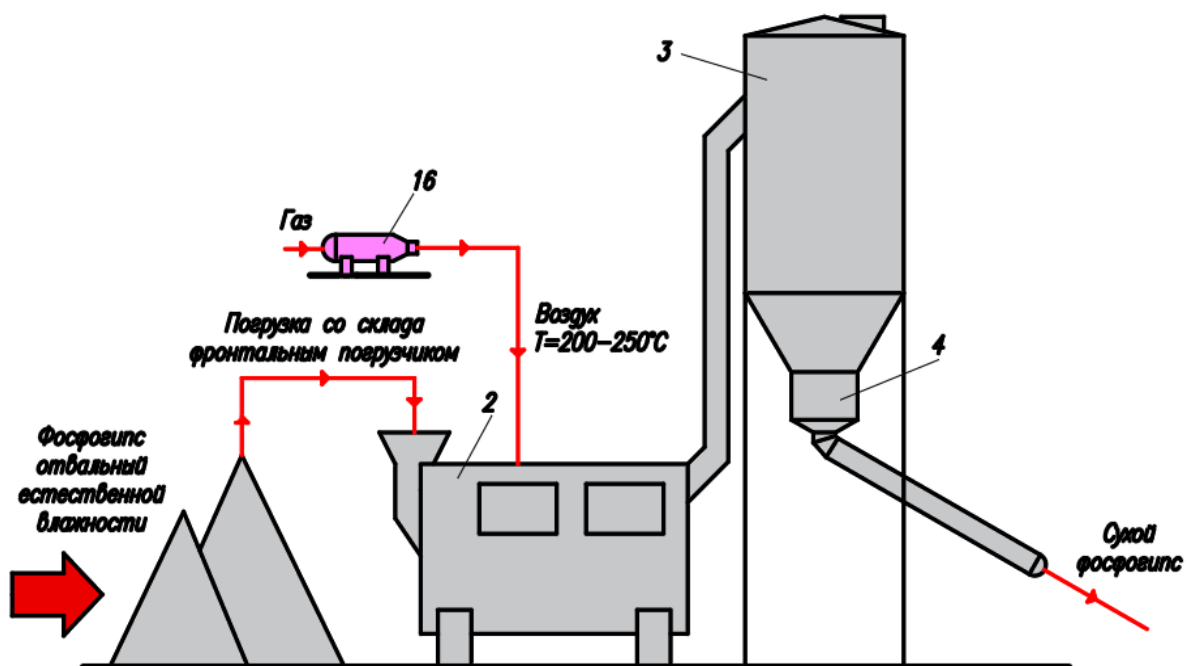
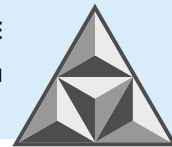


Рис. 3. Блок подготовки мелкого минерального заполнителя

Fig. 3. Fine mineral aggregate preparation unit



Фосфогипс необходимо складировать под тентом на складе производственного комплекса площадью 91.4 м² для обеспечения бесперебойной работы опытно-промышленной линии на протяжении 21 рабочей смены.

Фосфогипс один раз в две смены грузится фронтальным погрузчиком в центрифугальную мельницу-сушилку ЦМС-10 (поз. 2). В нее через горелку КП-25Б (поз. 16) нагнетается газовая среда с температурой (225 ± 25)°С. При рекристаллизации (в полуводный тип Б), а также при снижении влажности (с 25.0-40.0 до 2.5%) или помоле частиц (до размера ≤ 0.016 мм) фосфогипс горячей струей газа переносится на высоту 5.5 м в силос СЦ-8 (поз. 3) и там оседает. Избыточное давление стравливается через фильтр-пылеуловитель силоса. Для одного цикла грануляции фосфогипс взвешивается 4-6 порциями (от 16.3 до 24.5 кг) на бункерных весах «НИВА-6» (поз. 4), заполняемых при открытии шиберной заслонки силоса и включении аэрационного вибропобудителя.

На рис. 4 представлен блок подготовки модифицированного вяжущего.

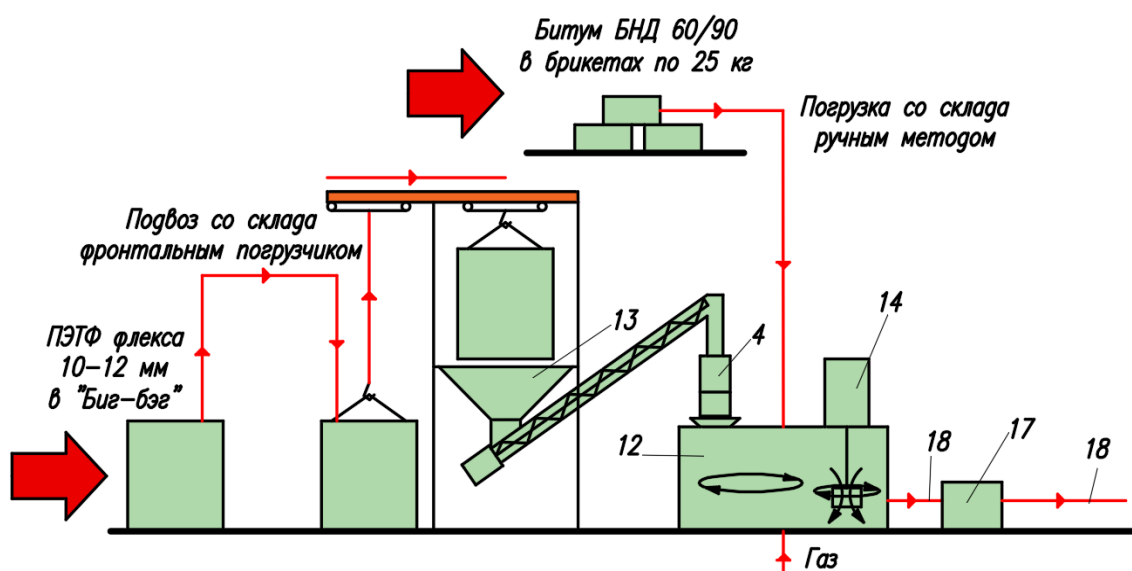
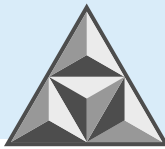


Рис. 4. Блок подготовки модифицированного вяжущего

Fig. 4. Modified binder preparation unit

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) в виде фракции 10-12 мм (измельченная ПЭТФ-тара) и битум БНД 60/90 в брикетах по 25 кг складировается в мешках «Биг-Бэг» и паллетах на складе производственного комплекса ДСМ площадью соответственно 4.2 и 16.3 м² для обеспечения бесперебойной работы опытно-промышленной линии на протяжении 21 рабочей смены.

«Биг-Бэг», наполненный ПЭТФ-флексой, один раз за шесть смен перемещается погрузчиком к станции растаривания РББ-1 (поз. 13), поднимается лебедкой на роликовом подвесе и растаривается в бункер хранения. Для каждого цикла грануляции (при условии поддержания объема модифицированного вяжущего в битумоварке от 140 до 180 л) ПЭТФ-флекса подается шнековым питателем в бункерные весы «НИВА-6», взвешивается одной порцией ($m = 2.8$ кг) и подается в газовую битумоварку ПК-200 (поз. 12). Совместно с ПЭТФ-флексой ручным методом вносится брикет битума ($m = 25.0$ кг); температура в битумоварке $T_6 = (240 \pm 5)$ °С. Гомогенизация смеси и диспергирование ПЭТФ обеспечивается лопастной мешалкой «УБМ «Битум»» (поз. 14) с частотой вращения вала 1 Гц. По подогреваемому рукаву (поз. 18) модифицированное вяжущее поступает к насосу ДС-215Э (поз. 17) и дозируется 5-7 порциями (от 3.6 до 5.0 кг) в гранулятор.



Процесс грануляции начинается со ввода щебня одной порцией и его термообработки при температуре газовой струи $T_{z.c} = (200 \pm 10)^\circ\text{C}$. Термообработка щебня длится в течение 5-7 мин или до достижения температуры щебня 160°C и влажности 0.5%. Далее производится ввод 5-7 доз модифицированного вяжущего и 4-6 доз фосфогипса при температуре газовой струи $T_{z.c} = (160 \pm 10)^\circ\text{C}$. Температура смеси поддерживается на уровне $T_c = (155 \pm 5)^\circ\text{C}$. Частота вращения гранулятора составляет 0.26 Гц, угол наклона оси к горизонту – 55° ; каждый цикл наката слоя оболочки гранулы занимает от 45 до 60 с.

На рис. 5 представлен блок фасовки гранулированной асфальтобетонной смеси.

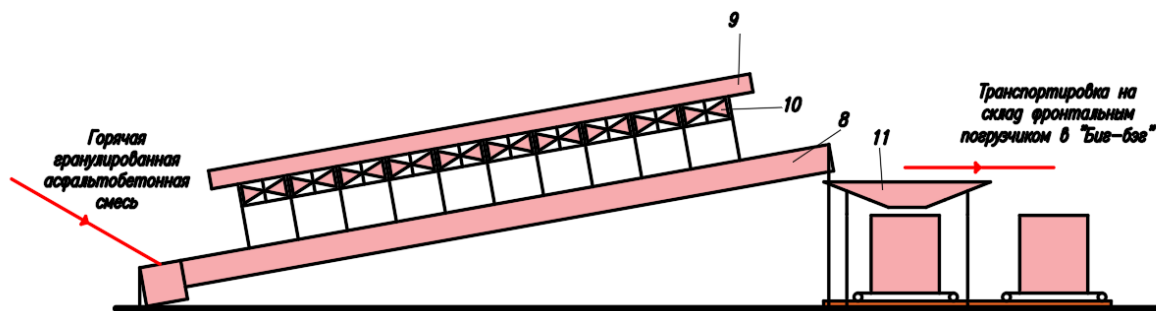


Рис. 5. Блок фасовки гранулированной асфальтобетонной смеси

Fig. 5. Granulated asphalt concrete mix packing unit

Гранулятор выравняется в положение оси 0° к горизонту. Смесь выгружается в течение 1 мин на конвейер ЛК-С-П-Ш-500-10000-NMRV075 (поз. 8), установленный под углом 18° для подъема на высоту 3.1 м идвигающийся со скоростью $2 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$.

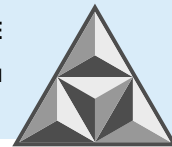
Начиная со второго метра, через каждый 1.0 м на конвейере установлены перелопачивающие брусья с постепенно уменьшающимся просветом между ребром бруса и полотном конвейера (от 70 до 30 мм). Скорость движения ленты конвейера спустя 1 мин с момента начала выгрузки на нее смеси замедляется до $0.55 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$. На крытой раме (поз. 9) через 1 м установлены вентиляторы «Элком ВО 06-300» (10 шт.); при этом на пяти первых вентиляторах установлены дождевальные форсунки. Воздействие дождевальных установок и вентиляторов позволяет снизить температуру ГАБС со 155 ± 5 до 50°C .

Смесь падает с отметки 3.1 м в установленную на 0.6 м ниже горловину станции затаривания «Биг-Бэг СЗ-500» серии «СтройПак» (11) с решеткой из арматуры ($d = 8 \text{ мм}$) с шагом 50 мм для разрушения слипшихся гранул. ГАБС дозируется в «Биг-Бэг» по 1000 кг и транспортируется на склад готовой продукции площадью 178.2 м^2 .

Потребность в кадровых ресурсах составляет 4 чел.: директор/бухгалтер, главный инженер-технолог/научный руководитель предприятия, инженер-технолог и оператор-механизатор. Фонд оплаты труда (ФОТ) и отчисления в Социальные фонды рассчитаны исходя из средней заработной платы на производстве по Саратовской области, оцениваемой в 50 тыс. руб.

В качестве необходимого средства механизации определен легкий фронтальный погрузчик на базе МТЗ 82.1 с грузоподъемностью рамы $\geq 1000 \text{ кг}$ и быстросъемным креплением класса В+. Минимальная высота выгрузки составляет 3.5 м.

Ввиду использования газового оборудования рассчитано пиковое потребление газа – $62 \text{ н.м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$. Приоритетным вариантом является природный магистральный газ (метан), с врезкой в газопровод высокого давления ($P = 0.6 \text{ МПа}$, $D = 325 \text{ мм}$), установкой газорегуляторного пункта ГРПШ-НР100/В-У1-ЭК с тремя линиями редуцирования НР100/В и седлом клапана $d = 30 \text{ мм}$. При необходимости может быть организовано независимое снабжение газом (сжиженная пропан-бутановая смесь); при этом одной емкости объемом 50 м^3 достаточно для обеспечения производства на протяжении 21 рабочей смены.



Энергопотребление электрооборудования рассчитано для трех режимов: пиковое – 42.50 кВт·ч⁻¹; среднее – 29.11 кВт·ч⁻¹ (с учетом коэффициента использования); минимальное аварийное – 25.30 кВт·ч⁻¹ (с учетом необходимости завершения технологических операций без риска повреждения оборудования).

Определение стоимостных характеристик материала является связующим звеном между научным поиском и практическим внедрением результатов разработки. Современное представление о подходах к определению стоимости новых материалов в научных публикациях зачастую ограничивается примитивным суммированием цены затраченных сырьевых компонентов на единицу дорожной продукции (в лабораторных условиях). Однако подобная оценка не является релевантной и даже не выражает в полной мере понятия «себестоимость».

Изучение характеристик дорожного строительного материала путем проработки технологии производства в условиях, отличных от лабораторных, позволяет определить себестоимость и спрогнозировать цену.

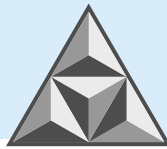
Несомненно, результаты исследования представляют собой эксперимент, моделирующий процесс производства дорожного материала на промышленном оборудовании. Подобная логика дает возможность обнаружить недостатки технологии еще в лабораторных условиях и позволяет создать более жизнеспособный и полезный продукт. Полученные данные являются важными для последующего проектирования и организации промышленного производства ГАБС в реальных условиях, что является основной целью дальнейших исследований в данном направлении.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты представляют собой научно-обоснованное техническое и технологическое решение производства гранулированной асфальтобетонной смеси в опытно-промышленных условиях. Разработан комплекс мер, направленных на обеспечение эффективного функционирования опытно-промышленной линии, описан краткий технологический регламент производства, определено функциональное назначение производственного оборудования и его состав, а также согласованы инженерные решения и планировка узлов.

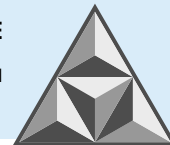
Данные о составе узлов опытно-промышленной линии производства гранулированной асфальтобетонной смеси, потребности в сырье, кадровых и энергоресурсах позволили оценить ее себестоимость на IV квартал 2024 года (5.24 тыс. руб. за 1 т). С учетом рентабельности строительной отрасли (20%) [21] и налога на добавленную стоимость (НДС = 20%), расчетная цена 1 т ГАБС составляет 7.55 тыс. руб. Указанная себестоимость, цена и технико-эксплуатационные характеристики ГАБС (при уплотнении в горячем состоянии при 120°C) сопоставимы с показателями для современных горячих асфальтобетонных смесей.

Согласно анализу рыночных предложений, цена холодных асфальтобетонных смесей варьируется от 14 до 60 тыс. руб. за 1 т; при этом технико-эксплуатационные характеристики холодных асфальтобетонных смесей значительно уступают горячим. Целесообразным представляется применение разработанной ГАБС в холодном состоянии, так как цена ее при $t_{упл} = 20^\circ\text{C}$ в 2-8 раз меньше, при повышенном (в 2.0-2.5 раз) уровне эксплуатационных показателей по сравнению с холодными аналогами. Настоящую разработку предлагается использовать при ремонте покрытий мелкими картами или укладке небольших покрытий на участках с низкой интенсивностью движения.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Королев Е.В.** Перспективы развития строительного материаловедения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 3. С. 143-159. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-3-143-159.
2. **Mohsin U.K.** Problems of technology transfer from CSIR laboratories to industry and policy issues in India and Korea // *Социология науки и технологий*. 2012. № 3 (2). P. 51-74.
3. **Morone J., Ivins R.** Problems and Opportunities in Technology Transfer from the National Laboratories to Industry // *Research Management*. 1982. № 25 (3). P. 35-44. DOI: 10.1080/00345334.1982.11756731.
4. **Ширяева Ю.С., Оранова М.В.** Современный взгляд на опытное производство и механизм управления им на промышленном предприятии // *Вестник ННГУ*. 2007. № 6. С. 197-200.
5. Патент № 2701007 Российская Федерация, МПК7 С 04 В 26/26, С 08 L 95/00, С 04 В 18/04, В 09 В 3/00, С 04 В 111/20, С 04 В 111/27. Способ получения асфальтовяжущего на основе фосфогипса: опубл. 24.09.2019 / **Голиков И.В., Готовцев В.М., Игнатъев А.А., Герасимов Д.В.**
6. Патент № 2762177 Российская Федерация, МПК7 С 04 В 26/26, С 08 L 95/00, В 09 В 3/00. Способ получения гранулированной асфальтобетонной смеси на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов: опубл. 16.12.2021 / **Герасимов Д.В., Готовцев В.М., Игнатъев А.А.**
7. **Ignatiev A.A., Gerasimov D.V., Golikov I.V., Gotovtsev V.M.** Dispersed-filled composites with a structured nanoscale // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. № 365, p. 032064. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032064.
8. **Герасимов Д.В., Игнатъев А.А., Готовцев В.М.** Фосфогипс как компонент дисперсно-упрочненного композита на примере гранулированной асфальтобетонной смеси // *Вестник Евразийской науки*. 2020. № 5. С. 35.
9. **Gerasimov D.V., Lebedev A.E., Ignatyev A.A., Murashov A.A.** Research of the petroleum road bitumen modification process with secondary polyethylene terephthalate // *E3S Web of Conferences*. 2023. № 457. P. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202345701013.
10. **Герасимов Д.В.** Прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 65-71. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71.
11. **Belyaev P.S., Frolov V.A., Makeev P.V., Shachkov I.V. et al.** Equipment design automation at asphalt-concrete production modernization // *Journal of Physics: Conf. Ser. – IOP Publishing*. 2019. № 1260 (3). P. 032004. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032004.
12. **Rudenko A.I., Pidlisna E.A., Terekh M., Nishchik A.P.** Innovative equipment for oil-refining and asphalt-concrete enterprises // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 3. P. 63-70.
13. **Kovács R., Czímerová A., Fonód A., Mandula J.** The Use of Waste Low-Density Polyethylene for the Modification of Asphalt Mixture // *Buildings*. 2024. № 14 (10). P. 3109. DOI: 10.3390/buildings14103109.
14. **Schönauer P., Gruber M.R., Hofko B.** Case study of a batch asphalt mix plant: Energy consumption and emission allocation based on primary data // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. № 21. P. e03669. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03669.
15. **Dos Santos M.B., Candido J., de Souza Baule S., de Oliveira Yu.M.M. et al.** Greenhouse gas emissions and energy consumption in asphalt plants // *Revista Eletrônica Em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental*. 2020. № 24. DOI: 10.5902/2236117062662.
16. **Bražiūnas J., Sivilevičius H.** The bitumen batching system's modernization and its effective analysis at the asphalt mixing plant // *Transport*. 2010. № 25 (3). P. 325-335. DOI: 10.5902/2236117062662.
17. **Wang J., Hu Zh., Fu J., Yang F.** Research on Energy Consumption Monitoring and Evaluation Technology for Asphalt Mixing Plants Based on the Internet of Things // *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2024. № 512 (11). P. 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202451202007.
18. **Uaissova M., Zharlykassov B.** Application of AI Techniques for Asphalt Concrete Mix Production Optimization // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2024. № 57 (2). P. 353. DOI: 10.18280/jesa.570205.
19. **Deef-Allah E., Abdelrahman M.** Interactions between RAP and virgin asphalt binders in field, plant, and lab mixes // *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2022. № 13 (1). P. 231-249. DOI: 10.30574/wjarr.2022.13.1.0744.
20. **Yu X., Li Y.** Optimal percentage of reclaimed asphalt pavement in central plant hot recycling mixture // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2010. № 25. P. 659-662. DOI: 10.1007/s11595-010-0065-4.



21. **Кондукторов А.С.** О влиянии субподряда на формирование цены объектов, производство (строительство) которых финансируется государством // *Вестник экономической безопасности*. 2020. № 4. С. 40-43. DOI: 10.24411/2414-3995-2020-10227.

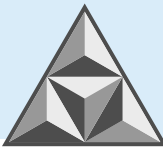
Поступила в редакцию 28.10.2024

Одобрена после рецензирования 26.11.2024

Принята к опубликованию 12.12.2024

REFERENCES

- Korolev, E.V.** (2020), "Prospects for the development of building materials science", *Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, vol. 3, pp. 143-159. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-3-143-159 (in Russian).
- Mohsin, U.K.** (2012), "Problems of technology transfer from CSIR laboratories to industry and policy issues in India and Korea", *Sotsiologiya nauki i tekhnologii [Sociology of science and technology]*, vol. 3, no. 2, pp. 51-74.
- Morone, J. and Ivins, R.** (1982), "Problems and Opportunities in Technology Transfer from the National Laboratories to Industry", *Research Management*, vol. 25, no. 3, pp. 35-44. DOI: 10.1080/00345334.1982.11756731.
- Shiryayeva, Yu. S. and Oranova, M.V.** (2007), "Modern view of pilot production and its management mechanism at an industrial enterprise", *Vestnik NNGU [Bulletin of NNSU]*, vol. 6, pp. 197-200 (in Russian).
- Golikov, I.V., Gotovtsev, V.M., Ignatiev, A.A. and Gerasimov, D.V.** (2019), A method for producing an asphalt binder based on phosphogypsum, RUS, Patent RF № 2701007.
- Gerasimov, D.V., Gotovtsev, V.M. and Ignatiev, A.A.** (2021), A method for producing a granular asphalt concrete mixture based on dispersed industrial and household waste, RUS, Patent RF № 2762177.
- Ignatiev, A.A., Gerasimov, D.V., Golikov, I.V. and Gotovtsev, V.M.** (2018), "Dispersed-filled composites with a structured nanoscale", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 365, p. 032064. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032064.
- Gerasimov, D.V., Ignatiev, A.A. and Gotovtsev, V.M.** (2020), "Phosphogypsum as a component of a dispersed-reinforced composite on the example of a granular asphalt concrete mixture", *Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]*, vol. 5, p. 35 (in Russian).
- Gerasimov, D.V., Lebedev, A.E., Ignatyev, A.A. and Murashov, A.A.** (2023), "Research of the petroleum road bitumen modification process with secondary polyethylene terephthalate", *E3S Web of Conferences*, vol. 457, p. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202345701013.
- Gerasimov, D.V.** (2023), "Prediction of the granulometric composition of a granular asphalt concrete mixture", *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, no. 9, pp. 65-71. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71 (in Russian).
- Belyaev, P.S., Frolov, V.A., Makeev, P.V., Shachkov, I.V., Trapeznikov, E.V. and Belyaev, V.P.** (2019), "Equipment desing automation at asphalt-concrete production modernization", *Journal of Physics: Conf. Ser. – IOP Publishing*, vol. 1260, no. 3, p. 032004. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032004.
- Rudenko, A.I., Pidlisna, E.A., Terekh, M. and Nishchik, A.P.** (2018), "Innovative equipment for oil-refining and asphalt-concrete enterprises", *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, vol. 3, pp. 63-70. (in Russian).
- Kovács, R., Czímerová, A., Fonód, A. and Mandula, J.** (2024), "The Use of Waste Low-Density Polyethylene for the Modification of Asphalt Mixture", *Buildings*, vol. 14, no. 10, p. 3109. DOI: 10.3390/buildings14103109.
- Schönauer, P., Gruber, M.R. and Hofko, B.** (2024), "Case study of a batch asphalt mix plant: Energy consumption and emission allocation based on primary data", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03669. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03669.
- Dos Santos, M.B., Candido, J., de Souza, Baule S., de Oliveira, Yu.M.M. and Thives, L.P.** (2020), "Greenhouse gas emissions and energy consumption in asphalt plants", *Revista Eletrônica Em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental*, vol. 24. DOI: 10.5902/2236117062662.
- Bražiūnas, J. and Sivilevičius, H.** (2010), "The bitumen batching system's modernization and its effective analysis at the asphalt mixing plant", *Transport*, vol. 25, no. 3, pp. 325-335. DOI: 10.5902/2236117062662.
- Wang, J., Hu, Zh., Fu, J. and Yang, F.** (2024), "Research on Energy Consumption Monitoring and Evaluation Technology for Asphalt Mixing Plants Based on the Internet of Things", *E3S Web of Conf. – EDP Sciences*, vol. 512, no. 11, p. 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202451202007.



18. **Uaissova, M. and Zharlykassov, B.** (2024), "Application of AI Techniques for Asphalt Concrete Mix Production Optimization", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 57, no. 2, p. 353. DOI: 10.18280/jesa.570205.
19. **Deef-Allah, E. and Abdelrahman, M.** (2022), "Interactions between RAP and virgin asphalt binders in field, plant, and lab mixes", *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 231-249. DOI: 10.30574/wjarr.2022.13.1.0744.
20. **Yu, X. and Li, Y.** (2010), "Optimal percentage of reclaimed asphalt pavement in central plant hot recycling mixture", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*, vol. 25, pp. 659-662. DOI: 10.1007/s11595-010-0065-4.
21. **Konduktorov, A.S.** (2020), "On the impact of subcontracting on the pricing of facilities whose production (construction) is financed by the state", *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti [Bulletin of Economic Security]*, no. 4, pp. 40-43. DOI: 10.24411/2414-3995-2020-10227 (in Russian).

Received 28.10.2024

Approved 26.11.2024

Accepted 12.12.2024