

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА УСТРОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПО ТРАДИЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY BALANCE OF MAKING THE COATINGS OF HOT ASPHALT-CONCRETE MIXES BY CONVENTIONAL TECHNOLOGY AND WITH USE OF GRANULAR ASPHALT



**Д. Г. Игошкин,**  
заместитель начальника  
управления республиканского  
дочернего унитарного  
предприятия «Белорусский  
дорожный научно-  
исследовательский институт  
«БелдорНИИ», г. Минск,  
Беларусь,

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

**Н. П. Воронова,**  
директор института  
интегрированных форм  
обучения и мониторинга  
образования Белорусского  
национального технического  
университета, г. Минск,  
Беларусь

*В статье рассматривается технология устройства асфальтобетонных покрытий с использованием асфальтогранулята. Проведен анализ энергозатрат на устройство асфальтобетонного покрытия. Рассчитаны температурные режимы нагрева исходных материалов при приготовлении асфальтобетонной смеси. Определена экономическая эффективность технологии введения асфальтогранулята в состав горячей асфальтобетонной смеси. В результате исследований определено максимально допустимое содержание асфальтогранулята в составе асфальтобетонной смеси.*

*The article considers the technology of making the asphalt-concrete coatings with the use of granular asphalt. It performs the analysis of power inputs for making the asphalt-concrete coating. The temperature profiles of heating the source materials when preparing the asphalt-concrete mix are calculated. The cost effectiveness of introduction of granular asphalt into the hot asphalt-concrete mix composition has been determined. The investigation results determined the maximum allowable content of granular asphalt in the asphalt-concrete mix composition.*

### Введение

В странах Западной Европы, наряду с традиционными горячими асфальтобетонами, широко применяются асфальтобетонные смеси с использованием асфальтогранулята. При этом их объем составляет около 40 % от объема всех выпускаемых асфальтобетонных смесей. Необходимость использования асфальтогранулята вызвана как экологическими аспектами, так и высокой стоимостью и нехваткой материалов, используемых при производстве асфальтобетонных смесей.

В последнее время асфальтогранулят широко применяется и в нашей республике. Для этого имеется соответствующая нормативная база. В соответствии с СТБ 1705 [1] асфальтогранулят представляет собой зернистый минеральный материал, покрытый органическим вяжущим, с крупностью зерен до 40 мм. Его получают в процессе измельчения лома асфальтобетонных покрытий в дробильных установках, при холодном фрезеровании асфальтобетонных покрытий и применяют для устройства покрытий и оснований автомобильных дорог и объектов благоустройства, а также для других видов дорожных работ.

Наиболее широко в нашей республике асфальтогранулят используется при устройстве щебеночных оснований в качестве

расклинивающего материала. Имеющийся опыт использования асфальтогранулята в таком качестве подтвердил его высокую эффективность. К сожалению, такое применение асфальтогранулята практически исключает его повторное использование в дальнейшем, в то время как технологии применения асфальтогранулята в асфальтобетонных слоях позволяют повторно использовать его неограниченное количество раз. Фактически на основе технологии повторного использования асфальтогранулята в асфальтобетонных слоях можно достичь замкнутого цикла, при котором потребность в дефицитных и дорогостоящих новых материалах сводится к минимуму, что очень актуально в существующих экономических условиях.

Результаты лабораторных исследований [2, 3] асфальтобетонных смесей с асфальтогранулятом подтверждают эффективность применения асфальтогранулята при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

Эффективность строительных технологий, в том числе дорожных, оценивают, как правило, по величине приведенных затрат, сопоставляя стоимость реализации различных технических решений. Однако экономические показатели не всегда объективно отражают эффективность разрабатываемой технологии.

В условиях существующих рыночных отношений стоимость работ определяется на договорной основе между заказчиком и исполнителем работ. Вариации ценовых показателей зависят от ряда конъюнктурных факторов, условий ценообразования и правил налогообложения, не связанных непосредственно с рассматриваемым техническим решением.

Объективным критерием оценки эффективности различных технологий является анализ энергозатрат, необходимых для реализации принятых проектных решений. Затраты энергии в киловатт-часах или тоннах условного топлива не зависят от колебаний экономических факторов и объективно характеризуют техническую эффективность рассматриваемой технологии.

### **Технология приготовления горячей асфальтобетонной смеси с использованием асфальтогранулята**

Долгое время ремонт разрушенных покрытий автомобильных дорог осуществлялся путем укладки слоя усиления. При этом дефекты старого покрытия не устранялись, они копировались новым покрытием, что значительно снижало эффективность ремонтных работ. Поэтому в последние годы перед укладкой нового слоя

существующее асфальтобетонное покрытие с большим количеством дефектов все чаще удаляют фрезерованием. Продукты этого процесса могут вывозиться на свалку, использоваться на месте для получения нового основания или регенерироваться на асфальтобетонных заводах (АБЗ) [4].

Технология регенерации на АБЗ [5] включает следующие этапы:

- снятие старого асфальтобетонного покрытия фрезерованием;
- доставку асфальтогранулята автотранспортом на передвижной или стационарный АБЗ;
- приготовление новой асфальтобетонной смеси из асфальтогранулята с добавлением каменных материалов, вяжущего и специальных добавок.

Для регенерации асфальтогранулята могут использоваться как обычные асфальтосмесительные установки, дополненные оборудованием для хранения, транспортирования и дозирования старого асфальтобетона, так и специальные.

Асфальтосмесительные установки, работающие по классической башенной схеме, дополняются системами хранения, дозирования и транспортирования асфальтогранулята, состоящими из приемного бункера с питателем, конвейера и накопительного бункера с питателем.

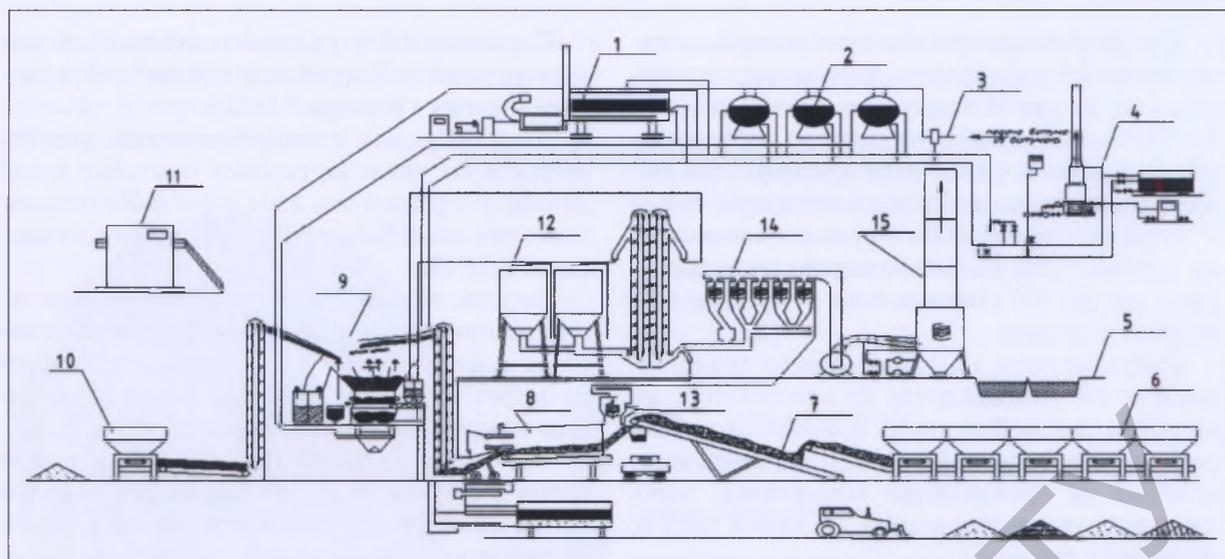
Схема асфальтосмесительной установки с дополнительным оборудованием для использования асфальтогранулята представлена на рисунке 1.

Исходные каменные материалы предварительно дозируют в агрегате питания 6, высушивают и нагревают в сушильном барабане 8, затем подают элеватором в смеситель 9, где сортируют на фракции, дозируют и перемешивают с битумом, минеральным порошком и уловленной пылью. Дробленый асфальтогранулят загружается в приемный бункер, из которого питателем он подается на конвейер 10.

В зависимости от принятой технологии асфальтогранулят может подаваться конвейером в горячий элеватор, весовой бункер или мешалку.

При загрузке асфальтогранулята в горячий элеватор его нагрев обеспечивается длительным контактом с горячими каменными материалами. Недостатком такой схемы является загрязнение ковшей, сит грохота и других элементов оборудования битумом. Кроме того, возможно неравномерное поступление в смеситель старого асфальтобетона, приводящее к колебаниям содержания битума в смеси.

При подаче асфальтобетона в весовой бункер гарантируется его точная дозировка. Однако при контакте асфальтогранулята с горячими ка-



1 – нагреватель битума; 2 – битумные цистерны; 3 – подача битума из битумохранилища; 4 – нагреватель жидкого теплоносителя; 5 – шламоотстойник; 6 – агрегат питания; 7 – конвейер наклонный; 8 – сушильный барабан; 9 – смесительный агрегат; 10 – линия подачи асфальтогранулята; 11 – кабина оператора; 12 – агрегат минерального порошка; 13 – 1-я ступень (предварительная) очистки дымовых газов; 14 – 2-я ступень очистки дымовых газов; 15 – 3-я ступень очистки дымовых газов

**Рисунок 1 – Технологическая схема асфальтосмесительной установки**

менными материалами возможно загрязнение бункера битумом, что также будет сказываться на точности дозирования материалов. Так как время контакта асфальтогранулята с горячими материалами в весовом бункере невелико, то его нагрев будет продолжаться в смесителе при перемешивании с нагретыми минеральными материалами.

При подаче асфальтогранулята непосредственно в смеситель сложности, связанные с загрязнением элеватора или накопительных бункеров, не возникают. Однако и в этом случае разогрев холодного асфальтогранулята в смесителе происходит за счет нагретых каменных материалов.

Асфальтогранулят может добавляться в новую смесь в количестве до 30 %– 50 % по массе, что позволяет восстановить свойства состарившегося битума и скорректировать гранулометрический состав. Часто этого бывает достаточно, для того чтобы рекомендовать регенерированную асфальтобетонную смесь для устройства верхних слоев покрытий.

Результаты исследований влияния асфальтогранулята на физико-механические свойства горячего асфальтобетона изложены в [4, 5].

Асфальтобетоны из горячих смесей, приготовленных с использованием асфальтогранулята, имеют более высокую сдвигоустойчивость по сравнению с традиционными плотными асфальтобетонами, при этом обладают низкой температурной и усталостной трещиностойкостью, что обусловлено старением битума, со-

держась в асфальтогрануляте, в процессе устройства асфальтобетонного покрытия и его эксплуатации.

С увеличением содержания асфальтогранулята в составе смеси значение коэффициента водостойкости увеличивается, а значение коэффициента морозостойкости уменьшается. Увеличение толщины битумных пленок позволяет снизить отрицательное влияние асфальтогранулята на коррозионную устойчивость асфальтобетона.

Асфальтобетонные смеси, содержащие до 20 % асфальтогранулята, обладают достаточной долговечностью и согласно [6] могут быть использованы для устройства покрытий автомобильных дорог.

#### **Анализ энергозатрат при устройстве асфальтобетонных покрытий**

Для объективной оценки эффективности технологии использования асфальтогранулята в составе горячих асфальтобетонных смесей, приготовляемых на АБЗ, был проведен анализ энергозатрат, необходимых на устройство асфальтобетонного покрытия по традиционной и рассматриваемой технологиям.

Энергозатраты при устройстве асфальтобетонных покрытий складываются из затрат на производство исходных материалов, транспортировку их к месту приготовления асфальтобетонных смесей, приготовление смесей, транспортировку и укладку смесей в покрытие.

Для устройства однослойного покрытия автомобильной дороги третьей категории толщиной 5 см, шириной 8 метров и протяженностью 1000 м требуется около 400 м<sup>3</sup> или 1000 тонн асфальтобетонной смеси типа Б марки I по [6]. Для приготовления такого количества смеси необходимо около 440 т крупного заполнителя (щебень), 400 т мелкого заполнителя (песок природный), 100 т минерального порошка, 60 т вяжущего (битум).

Энергозатраты на производство исходных материалов складываются из энергозатрат на производство щебня, песка природного, минерального порошка и битума [7]. Расчет энергозатрат на производство материалов, необходимых для приготовления 1 т смеси типа Б, приведен в таблице 1.

**Таблица 1 – Энергозатраты на производство исходных материалов**

Материал	Расход материала для приготовления 1 т смеси типа Б, т	Расход энергии на производство 1 т исходного материала, ГДж	Расход энергии на приготовление исходных материалов в составе 1 т смеси типа Б, ГДж
Щебень	0,440	0,060	0,026
Песок	0,400	0,016	0,006
Минеральный порошок	0,100	0,060	0,006
Битум	0,060	0,620	0,037
Итого:			0,076

Суммарные энергозатраты на производство исходных материалов для устройства 1 км асфальтобетонного покрытия составляют 76 ГДж.

Энергозатраты на транспортировку исходных материалов на асфальтобетонный завод зависят от дальности возки.

Согласно [7], удельный расход энергоресурсов при перевозке щебня железнодорожным транспортом составляет в среднем 1,15 ГДж на 10 000 т/км. При средней дальности возки щебня железнодорожным транспортом, составляющей 350 км, транспортировка необходимого количества щебня потребует около 17,7 ГДж.

Удельный расход энергоресурсов при перевозке минеральных материалов автомобильным транспортом принимаем 0,857 ГДж на 1000 т/км. При средней дальности возки песка, составляющей 15 км, затраты на транспортировку 400 т составят около 5,1 ГДж.

Доставка 100 т минерального порошка на расстояние 350 км потребует затрат энергии около 30 ГДж.

Перевозка 60 т вяжущего автомобильным транспортом на расстояние 150 км требует затрат энергии в размере 7,7 ГДж.

Таким образом, суммарные затраты энергоресурсов на транспортировку исходных материалов для устройства 1 км асфальтобетонного покрытия на асфальтобетонный завод составят около 60,6 ГДж.

Затраты энергии на технологические операции по приготовлению асфальтобетонной смеси на асфальтобетонном заводе складываются из затрат на подготовительные операции, нагрев и перемешивание материалов.

Поскольку большинство АБЗ в настоящее время работают «с колес», затратами энергии на разогрев битума при сливе или извлечении из битумохранилища можно пренебречь.

На разогрев 1 т битума марки 70/100 до температуры 140 °С затрачивается 0,105 ГДж.

Затраты энергии на сушку существенно зависят от влажности каменных материалов. На сушку 1 т каменных материалов с влажностью 2 % требуется около 198 МДж.

На нагрев 1 т каменных материалов на 1 °С необходимо затратить около 0,7 МДж.

Суммарные затраты энергоресурсов на сушку и нагрев исходных материалов до температуры 170 °С для устройства 1 км покрытия составляют около 213,8 ГДж.

Суммарные затраты энергии на приготовление 1 т смеси на АБЗ, состоящие из затрат на внутривозное перемещение материалов (0,005 ГДж/т), затрат электроэнергии на вращение сушильного барабана и систем пылеочистки (0,005 ГДж/т), а также на работу смесителя (0,0041 ГДж), составляют в среднем около 0,0141 ГДж/т. Для приготовления 1000 т асфальтобетонной смеси потребуется около 14,1 ГДж.

Затраты на транспортировку, укладку и уплотнение 1 т смеси в покрытие примем 0,874 ГДж/т.

Суммарная энергоемкость строительства 1 км однослойного покрытия автомобильной дороги третьей категории толщиной 5 см и шириной 8 метров составляет около 402,9 ГДж.

Таким образом, анализ энергозатрат на устройство асфальтобетонного покрытия показывает, что затраты на приготовление исходных материалов составляют около 19 %, транспортировка исходных материалов на АБЗ потребует еще около 15 %, на производственный процесс приготовления смеси затрачивается чуть боль-

ше половины от общих затрат энергии – 56 %, на транспортировку готовой смеси к месту укладки и устройство покрытия – около 10 % от общих энергозатрат (рис. 2).



Рисунок 2 – Структура энергозатрат на устройство асфальтобетонного покрытия

Проведенный анализ позволяет определить наиболее эффективные мероприятия по снижению энергозатрат при устройстве асфальтобетонных покрытий.

Непосредственно на приготовление и укладку асфальтобетонного покрытия расходуется около 66 % от общих энергозатрат. Снижение доли этих статей расхода трудновыполнимо, так как требует существенного изменения технологии, модернизации или полной замены оборудования, разработки новых типов асфальтобетонных смесей и т. д.

На приготовление и транспортировку исходных материалов расходуется около трети общих энергозатрат. Эти энергозатраты можно сравнительно легко уменьшить, не внося существенных изменений в традиционную технологию приготовления и укладки, например, используя в качестве исходного сырья для приготовления асфальтобетонной смеси асфальтогрануляты, полученный путем фрезерования некачественного покрытия существующих автомобильных дорог.

#### Расчет температурного баланса и энергозатрат при приготовлении асфальтобетонной смеси с использованием асфальтогранулята

Как описывалось выше, нагрев асфальтогранулята при приготовлении асфальтобетонной смеси происходит в смесителе косвенным путем, за счет энергии перегретых исходных каменных материалов. Поэтому для обеспечения требуемой температуры готовой асфальтобе-

тонной смеси важно рассчитать температурный баланс материалов, поступающих в смеситель.

Материалы, входящие в состав смеси, имеют различную начальную температуру  $T$  (от 10 °С до 200 °С) и смешиваются в различных пропорциях. При этом происходят интенсивные процессы энергообмена между «горячими» и «холодными» материалами [8].

Температуру полученной смеси на стадии проектирования технологического процесса можно определить из формулы (1) [9], при этом рассеиванием энергии в окружающую среду можно пренебречь.

$$\begin{aligned}
 & [M_{щ} \cdot T_{щ} \cdot (c_{щ} + 0,042 \cdot V_{щ}) + M_{п} \cdot T_{п} \cdot (c_{п} + 0,042 \cdot V_{п}) + \\
 & + M_{мп} \cdot T_{мп} \cdot (c_{мп} + 0,042 \cdot V_{мп}) + \\
 & + M_{б} \cdot T_{б} \cdot (c_{б} + 0,042 \cdot V_{б})]_{вх} = \quad (1) \\
 & = [M_{щ} \cdot (T_{абс} \cdot c_{щ} + 25,4 \cdot V_{щ}) + M_{п} \cdot (T_{абс} \cdot c_{п} + 25,4 \cdot V_{п}) + \\
 & + M_{мп} \cdot (T_{абс} \cdot c_{мп} + 25,4 \cdot V_{мп}) + M_{б} \cdot (T_{абс} \cdot c_{б} + 25,4 \cdot V_{б})]_{вых},
 \end{aligned}$$

где  $M_{щ}$ ,  $M_{п}$ ,  $M_{мп}$ ,  $M_{б}$  – массы сухих материалов: щебня, песка, минерального порошка, битума, соответственно, поступающих на смешение, кг;

$T_{щ}$ ,  $T_{п}$ ,  $T_{мп}$ ,  $T_{б}$  – температура поступающих на смешение, соответственно, щебня, песка, минерального порошка, битума, °С;

$c_{щ}$ ,  $c_{п}$ ,  $c_{мп}$ ,  $c_{б}$  – удельная массовая изобарная (в интервале температур от 0 °С до  $t$  °С) средняя теплоемкость, соответственно, щебня, песка, минерального порошка, битума, кДж/(кг·°С).

$V_{щ}$ ,  $V_{п}$ ,  $V_{мп}$  – влажность исходных компонентов на сухую массу, соответственно, щебня, песка, минерального порошка, %;

$V_{б}$  – обводненность битума, %;

$v_x$  – нижний индекс, определяющий компоненты, поступающие на смешение;

$T_{абс}$  – температура асфальтобетонной смеси по завершении процесса смешения, °С;

$v_y$  – нижний индекс, определяющий ингредиенты готовой асфальтобетонной смеси.

Для расчета данной теплоемкости компонентов можно предложить эмпирические соотношения, где в качестве определяющей величины используется температура компонента в градусах Цельсия  $t$ :

- щебень (гранодиорит карьера «Микашевичи»):

$$c_{щ} = 0,749405 + 0,00181 \cdot t, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

- песок природный:

$$c_{п} = 0,812321 + 0,001743 \cdot t, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

- минеральный порошок (доломит карьера «Руба»):

$$c_{мп} = 0,879226 + 0,002702 \cdot t, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

- битум:

$$c_{б} = 1,675655 + 0,00191 \cdot t, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

В итоге, из приведенного балансового уравнения можно получить расчетное соотношение для температуры готовой асфальтобетонной смеси

$$T_{абс} = (A - B) / B, \quad (2)$$

где

$$A = m_{щ} \cdot T_{щ} \cdot (c_{щ} + 0,042 \cdot v_{щ}) + m_{п} \cdot T_{п} \cdot (c_{п} + 0,042 \cdot v_{п}) + m_{мп} \cdot T_{мп} \cdot (c_{мп} + 0,042 \cdot v_{мп}) + m_{б} \cdot T_{б} \cdot (c_{б} + 0,042 \cdot v_{б});$$

$$B = 25,4 \cdot (m_{щ} \cdot v_{щ} + m_{п} \cdot v_{п} + m_{мп} \cdot v_{мп} + m_{б} \cdot v_{б});$$

$$B = m_{щ} \cdot c_{щ} + m_{п} \cdot c_{п} + m_{мп} \cdot c_{мп} + m_{б} \cdot c_{б}.$$

Общий температурный баланс материалов, попадающих в смеситель, должен обеспечивать требуемую температуру готовой асфальтобетонной смеси. При расчетах требуемая температура готовой смеси принята согласно [6], равной  $150^\circ\text{C}$ . Для упрощения расчетов состав асфальтогранулята примем соответствующим составу готовой асфальтобетонной смеси.

Результаты расчета общего температурного баланса асфальтобетонной смеси с температурой  $150^\circ\text{C}$ , влажностью исходных каменных материалов и асфальтогранулята, равной  $2\%$ , и содержащей минеральный порошок, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет требуемой температуры каменных материалов в зависимости от состава асфальтобетонной смеси

	Номер состава смеси				
	1	2	3	4	5
Асфальтогранулят, %	0	10	20	30	40
Каменные материалы, %	84	75,6	67,2	58,8	50,4
Минеральный порошок, %	10	9	8	7	6
Битум, %	6	5,4	4,8	4,2	3,6
Температура смеси, $^\circ\text{C}$	150	150	150	150	150
Требуемая температура каменных материалов, $^\circ\text{C}$	170	193	221	255	300

Согласно приведенным результатам расчета, для «косвенного» нагрева относительно холодных минерального порошка и битума требуются значительные энергозатраты на «перегрев» каменных материалов (щебень, песок) в сушильном барабане.

Для приготовления асфальтобетонной смеси с температурой  $150^\circ\text{C}$  необходимо нагреть каменные материалы до температуры  $170^\circ\text{C}$ .

При введении в состав смеси асфальтогранулята требуемая температура нагрева каменных материалов еще увеличивается.

Необходимо отметить, что, исходя из условия обеспечения надежной работы сушильного барабана, максимальная температура нагрева каменных материалов не может быть выше  $230^\circ\text{C}$ – $240^\circ\text{C}$ . Согласно таблице 2, максимальное содержание асфальтогранулята в составе смеси не может превышать  $20\%$  от массы смеси. Для увеличения содержания асфальтогранулята в составе смеси необходима модернизация АБЗ, позволяющая произвести предварительный нагрев асфальтогранулята на отдельной линии.

Расчет суммарной энергоемкости строительства  $1\text{ км}$  однослойного покрытия автомобильной дороги третьей категории толщиной  $5\text{ см}$ , шириной  $8\text{ метров}$  из асфальтобетонной смеси, приготовленной с различным содержанием асфальтогранулята и минеральным порошком, приведен в таблице 3 и на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структура энергозатрат на строительство  $1\text{ км}$  покрытия автомобильной дороги

**Таблица 3 – Расчет требуемой температуры каменных материалов для приготовления смесей разных составов**

	Номер состава смеси				
	1	2	3	4	5
Асфальтогранулят, %	0	10	20	30	40
Энергозатраты на приготовление исходных материалов, ГДж	76	68,4	60,8	53,2	45,6
Энергозатраты на транспортировку исходных материалов, ГДж	60,6	56,6	52,7	48,8	44,9
Энергозатраты на приготовление смеси, ГДж	227,9	218,7	209,1	198,7	188,2
Общие энергозатраты на устройство покрытия, ГДж	402,9	382,1	361,1	339,2	317,2

При введении в состав смеси 20 % асфальтогранулята энергозатраты на устройство асфальтобетонного покрытия снижаются на 10 %. Снижение общих энергозатрат происходит в основном за счет энергозатрат на приготовление исходных материалов и транспортировки их на АБЗ.

Как указывалось ранее, значительный «перегрев» каменных материалов при приготовлении смеси необходим для «косвенного» нагрева холодных материалов, в основном минерального порошка, подаваемого в мешалку без предварительного нагрева и имеющего температуру окружающей среды (около 20 °С).

Рассчитаем требуемую температуру каменных материалов в зависимости от состава асфальтобетонной смеси, не содержащей минеральный порошок (смеси марок II и III по [6]).

Результаты расчета общего температурного баланса асфальтобетонной смеси с температурой 150 °С, не содержащей минеральный порошок, влажностью исходных каменных материалов и асфальтогранулята, равной 2 %, приведены в таблице 4.

Исходя из условия обеспечения надежной работы сушильного барабана, максимальное

содержание асфальтогранулята в составе смеси марок II и III (без минерального порошка) может быть увеличено до 30 % от массы смеси.

Расчет суммарной энергоемкости строительства 1 км однослойного покрытия автомобильной дороги третьей категории толщиной 5 см, шириной 8 метров из асфальтобетонной смеси, приготовленной с различным содержанием асфальтогранулята и не содержащей минеральный порошок, приведен в таблице 5 и на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Структура энергозатрат на строительство 1 км покрытия автомобильной дороги**

**Таблица 4 – Расчет требуемой температуры каменных материалов для приготовления смесей разных составов**

	Номер состава смеси				
	6	7	8	9	10
Асфальтогранулят, %	0	10	20	30	40
Каменные материалы, %	94	84,6	75,2	65,8	56,4
Минеральный порошок, %	0	0	0	0	0
Битум, %	6	5,4	4,8	4,2	3,6
Температура смеси, °С	151	173	200	232	275
Требуемая температура каменных материалов, °С	150	150	150	150	150

**Таблица 5 – Расчет суммарной энергоемкости строительства 1 км покрытия автомобильной дороги**

	Номер состава смеси				
	6	7	8	9	10
Асфальтогранулят, %	0	10	20	30	40
Энергозатраты на приготовление исходных материалов, ГДж	71,6	64,4	57,3	50,1	43
Энергозатраты на транспортировку исходных материалов, ГДж	31,8	30,8	29,8	28,7	27,7
Энергозатраты на приготовление смеси, ГДж	240,1	230,5	220,7	209,6	198,6
Общие энергозатраты на устройство покрытия, ГДж	382,0	364,2	346,1	326,9	307,7

При введении в состав смеси 20 % асфальтогранулята суммарные энергозатраты на устройство асфальтобетонного покрытия снижаются на 10 %. Снижение общих энергозатрат происходит в основном за счет энергозатрат на приготовление исходных материалов и транспортировки их на АБЗ. При увеличении содержания асфальтогранулята до 30 % энергозатраты снижаются на 14 %.

### Заключение

Наиболее эффективным способом использования асфальтогранулята является применение его в составе асфальтобетонных смесей, приготавливаемых в стационарных асфальтосмесительных установках.

Требуемые характеристики асфальтобетонной смеси обеспечиваются при содержании ас-

фальтогранулята в смеси марки I до 20 % по массе, а в составе смесей марки II и III (без минерального порошка) – до 30 %. Это содержание асфальтогранулята в составе асфальтобетонной смеси обеспечивает нормальный режим работы сушильного барабана.

При введении в состав смеси 20 % асфальтогранулята энергозатраты на устройство асфальтобетонного покрытия снижаются на 10 %, а при содержании 30 % асфальтогранулята – на 14 %.

Снижение энергозатрат происходит в основном за счет энергозатрат на приготовление исходных материалов и транспортировку их на АБЗ.

Результаты проведенных исследований позволили внести изменения в СТБ 1033 [6] в части применения асфальтогранулята при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

### Список использованной литературы

1. Асфальтогранулят для транспортного строительства. Технические условия : СТБ 1705-2006.
2. Игошкин, Д. Г. Исследование влияния асфальтогранулята на свойства горячих асфальтобетонных смесей // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли» / г. Минск, 30–31 мая 2013 г. / Департамент «Белавтодор», БНТУ. – Минск, 2013. – 274 с.
3. Игошкин, Д. Г. Применение асфальтогранулята при устройстве асфальтобетонных покрытий // Мир дорог. – 2014. – № 73. – С. 65–69.
4. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона : учебное пособие / Э. В. Котлярский; под ред. Э. В. Котлярского. – М., 2004. – 194 с.
5. Гезенцев, Л. Б., Горелышев, Н. В., Богуславский, А. М., Королев, И. В. Дорожный асфальтобетон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1985. – 350 с.
6. Смесей асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия : СТБ 1033-2004.
7. Руденский, А. В. Анализ энергозатрат – объективный критерий технологической эффективности решений по строительству и ремонту дорожных асфальтобетонных покрытий // Дороги России XXI века. – 2005. – № 4. – С. 52–61.
8. Ковалев, Я. Н., Баховчук, А. П., Воронова, Н. П., Кравченко, С. Е., Игошкин, Д. Г. Теплотехнические расчеты при проектировании технологических процессов устройства асфальтобетонных покрытий // Строительная наука и техника. – 2007. – № 3. – С. 79–85.
9. Рекомендации по снижению энергозатрат при производстве асфальтобетонных смесей : ДМД 02191.7.004-2008.

Статья поступила в редакцию 29.09.2015.