

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

А.В. Скрыпников¹, П.В. Тихомиров², В.Э. Мэрсон¹,
Ю.Е. Кисель², И.И. Савченко^{1✉}, Д.А. Пискарев¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ВГУИТ), Россия, 394036, г. Воронеж, пр. Революции, д. 19

²ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (БГИТУ), Россия, 241037 г. Брянск, пр. Станке Димитрова, д. 3

ilona.savchenko.2016@mail.ru

Рассмотрены вопросы совершенствования технологий строительства автомобильных дорог малой интенсивности движения (до 1000 авт./сут.) в условиях низких температур (от –10 до –40 °С). Исследованы закономерности уплотнения асфальтобетонных смесей при отрицательной температуре воздуха, проанализирован набор прочности цементогрунтовых оснований с противоморозными добавками. Разработаны математические модели допустимого времени выполнения технологических операций с учетом теплопотерь. Выполнена оценка влияния температуры строительства на долговечность покрытия. Предложены рекомендации по оптимизации строительных процессов.

Ключевые слова: автомобильные дороги малой интенсивности; зимнее строительство; низкие температуры; уплотнение; цементогрунтовое основание; противоморозные добавки; долговечность покрытия; оптимизация технологий

Ссылка для цитирования: Скрыпников А.В., Тихомиров П.В., Мэрсон В.Э., Кисель Ю.Е., Савченко И.И., Пискарев Д.А. Совершенствование технологий строительства лесовозных дорог малой интенсивности в условиях низких температур // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 132–147. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-132-147

Автомобильные дороги малой интенсивности движения (до 1000 авт./сут., IV–V технические категории) составляют более 70 % общей протяженности дорожной сети Российской Федерации [1]. В регионах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока строительный сезон при положительных температурах ограничен 3...5 мес., что делает зимнее строительство неизбежным условием выполнения программ дорожного развития [2].

Строительство дорог при отрицательных температурах сопряжено с комплексом технологических трудностей: ускоренным остыванием асфальтобетонных смесей (далее — АБС), снижением эффективности уплотнения, замедлением набора прочности конструктивных слоев и промерзанием земляного полотна [3]. По данным Федерального дорожного агентства («Росавтодор»), срок службы покрытий, уложенных при температуре ниже –15 °С по стандартной технологии, сокращается на 30...50 % по сравнению с проектным [4].

Промерзание земляного полотна представляет особую опасность для долговечности дорожной конструкции. Глубина промерзания грунта определяется формулой Стефана

$$h_{\text{пр}} = \xi \cdot \sqrt{[2\lambda_{\text{гр}} \cdot |T_{\text{ср}}| \cdot t / (\rho_{\text{гр}} \cdot L_{\text{ф}})]}, \quad (1)$$

где ξ — безразмерный поправочный коэффициент (0,8...1,2);

$\lambda_{\text{гр}}$ — теплопроводность грунта, Вт/(м·К);

$T_{\text{ср}}$ — средняя температура воздуха за период промерзания, °С;

t — продолжительность промерзания, с;

$\rho_{\text{гр}}$ — плотность грунта, кг/м³;

$L_{\text{ф}}$ — удельная теплота фазового перехода воды (334 кДж/кг).

В районах Западной Сибири глубина сезонного промерзания достигает 2,0...2,5 м, что превышает расчетную глубину заложения дорожной конструкции (0,6...0,8 м для IV–V категорий) и вызывает морозное пучение, деформирующее покрытие снизу.

Для строительства дорог малой интенсивности проблема усугубляется ограниченным бюджетом и применением упрощенных конструкций дорожных одежд. Вместе с тем именно

на таких дорогах есть возможность применения альтернативных материалов и технологий, включая полимерно-битумное вяжущее (ПБВ), цементогрунтовые основания с противоморозными добавками и литые асфальтобетонные смеси, не требующие уплотнения катком [5].

Анализ зарубежного опыта показывает, что в странах Северной Европы (Норвегия, Финляндия, Швеция), где климатические условия сопоставимы с российскими, доля дорог, строящихся при отрицательных температурах, достигает 25...30 % общего объема дорожного строительства [6]. При этом применяются специализированные технологии: подогрев основания инфракрасными излучателями перед укладкой, использование теплых асфальтобетонных смесей (Warm Mix Asphalt — WMA) с пониженной температурой укладки на 20...30 °С, а также химическая модификация вяжущих реактивными полимерами (SBS — стирол-бутадиен-стирольный термоэластопласт; EVA — этиленвинилацетат), существенно расширяющими рабочий диапазон температур.

В Канаде, где протяженность дорог низких категорий в северных провинциях (Юкон, Северо-Западные территории, Нунавут) превышает 15 тыс. км, широко практикуется устройство покрытий из литого асфальтобетона (Gussasphalt) при температуре до –35 °С. Литой асфальтобетон обладает текучестью, достаточной для самовыравнивания и заполнения микронеровностей основания без механического уплотнения, что исключает проблему недоуплотнения [7]. Однако стоимость литых смесей на 40...60 % превышает стоимость стандартных горячих АБС, что ограничивает их применение для дорог с низким уровнем финансирования. Технология стабилизации грунтовых оснований с применением геополимерных вяжущих (на основе золы-уноса и шлаков), получившая распространение на Аляске, позволяет проводить работы при температуре до –20 °С без применения противоморозных добавок за счет экзотермического характера реакции геополимеризации [8].

В отечественной практике применение указанных технологий для дорог малой интенсивности носит эпизодический характер, что обусловлено недостаточной изученностью их эффективности в условиях экстремально низкой температуры (ниже –30 °С) и отсутствием адаптированных нормативных документов. Настоящее исследование призвано восполнить этот пробел [9].

Цель работы

Цель работы — анализ существующих и разработка усовершенствованных технологий строительства дорог малой интенсивности в

условиях низких температур, обеспечивающих нормативное качество покрытия при минимальных дополнительных затратах [10].

Достижение поставленной цели потребовало анализа структуры дефектов покрытий, построенных в зимний период и выявления их причинно-следственных связей с температурными условиями строительства, экспериментального исследования процессов уплотнения АБС при температурах от –10 до –40 °С с использованием различных типов оборудования; математического моделирования теплового режима конструктивных слоев дорожной одежды в процессе строительства; разработки рекомендаций по выбору оптимальных технологий в зависимости от температурных условий и технико-экономической оценки предложенных решений [11].

Материалы и методы

Анализ дефектов покрытий, построенных в зимний период. Для оценки влияния температурных условий строительства на качество дорожных покрытий проведен анализ данных диагностики 1200 км дорог IV–V категорий в Тюменской, Томской и Иркутской областях, построенных в период 2015–2023 гг. при температуре от –5 до –35 °С [12].

Обследование проводилось с использованием передвижной дорожной лаборатории, оснащенной георадаром с частотой зондирования 1,0 и 2,0 ГГц, лазерным профилометром для измерения ровности покрытия (IRI — International Roughness Index) и дефлектометром ударного нагружения (FWD — Falling Weight Deflectometer) для оценки несущей способности. Дополнительно на 85 контрольных участках выполнены вырубki кернов для определения фактической плотности, водонасыщения и прочности на сжатие покрытия [13]. Статистическая обработка результатов проведена методами дисперсионного и корреляционного анализа с использованием программного комплекса Statistica 12.0. Коэффициент корреляции между температурой воздуха в период строительства и индексом ровности IRI составлял $r = -0,78$ ($p < 0,01$), что подтверждает значимое влияние температурных условий на качество покрытия [14].

Результаты обследования показали статистически значимую зависимость между температурой строительства и водонасыщением покрытия. При строительстве в температурном диапазоне –20...–30 °С среднее водонасыщение керновых образцов составило 4,8...6,2 %, что на 1,5...2,5 % превышает нормативное значение

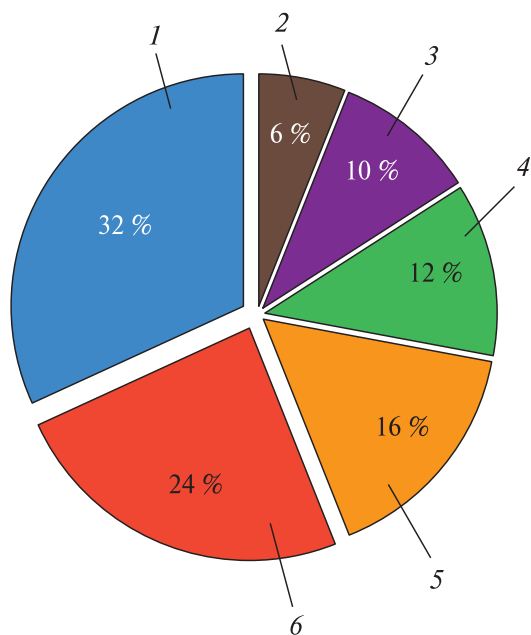


Рис. 1. Структура дефектов дорог малой интенсивности, построенных в зимний период: 1 — трещины от температурных напряжений; 2 — прочие дефекты; 3 — выбоины и разрушения кромок; 4 — колеи; 5 — шелушение поверхности; 6 — недоуплотнение покрытия

Fig. 1. Structure of defects on low-traffic roads built in winter: 1 — cracks from thermal stresses; 2 — other defects; 3 — potholes and edge failures; 4 — rutting; 5 — surface raveling; 6 — insufficient compaction

(не более 4 % по ГОСТ 9128–2013) и свидетельствует о наличии открытой пористости вследствие недоуплотнения [15]. Повышенное водонасыщение является предпосылкой ускоренного разрушения покрытия по механизму «замерзание — оттаивание»: при каждом цикле замерзания поровой воды давление кристаллизации льда вызывает прогрессирующее микротрещинообразование. Число циклов замерзания-оттаивания до начала визуального фиксируемого разрушения покрытия с водонасыщением 5...6 % составляет 50...80 циклов, тогда как при нормативном водонасыщении (менее 4 %) этот показатель возрастает до 200...300 циклов [16].

Как показано на рис. 1, доминирующими дефектами являются температурные трещины (32 %) и недоуплотнение покрытия (24 %). Температурные трещины обусловлены высокими термическими напряжениями, возникающими при резком охлаждении уложенной смеси [17]. Критическое термическое напряжение в покрытии определяется зависимостью

$$\sigma_T = E(T) \cdot \alpha_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

где $E(T)$ — модуль упругости покрытия при температуре T , МПа;

α_T — коэффициент линейного температурного расширения (для АБС: $2,0...2,5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); ΔT — температурный перепад, $^\circ\text{C}$.

При $\Delta T = 50...70 \text{ } ^\circ\text{C}$ (что типично для зимнего строительства) и $E = 3000...5000 \text{ МПа}$ термические напряжения достигают $3...8 \text{ МПа}$, что может превышать предел прочности АБС на растяжение [18].

Для предотвращения температурного трещинообразования критическое значение температурного перепада $\Delta T_{кр}$, при котором термические напряжения достигают предела прочности на растяжение, определяется по уравнению

$$\Delta T_{кр} = \frac{R_p(T)}{[E(T) \cdot \alpha_T]}, \quad (3)$$

где $R_p(T)$ — предел прочности покрытия на растяжение при температуре T , МПа.

Расчеты показывают, что для стандартных АБС типа Б критический температурный перепад составляет $35...45 \text{ } ^\circ\text{C}$, тогда как в ПБВ-модифицированных смесях этот параметр возрастает до $55...65 \text{ } ^\circ\text{C}$ благодаря повышенной деформативности при низких температурах. Это обстоятельство является одним из ключевых аргументов в пользу применения модифицированных вяжущих при зимнем строительстве [19].

Существенную долю дефектов составляет также неоднородность покрытия по плотности (18 %), обусловленная неравномерным остыванием смеси по площади укладываемой полосы. Термографические измерения показали, что разность температур между центром и краями полосы укладки при температуре воздуха $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ достигает $25...35 \text{ } ^\circ\text{C}$, что приводит к формированию зон с различной степенью уплотнения. Усталостная долговечность покрытия в зонах с пониженной плотностью снижается экспоненциально [20] и описывается зависимостью

$$N_f = N_0 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{\max}} \right)^n, \quad (4)$$

где N_f — число циклов нагружения до разрушения;

N_0 — базовое число циклов при максимальной плотности;

$\frac{\rho}{\rho_{\max}}$ — относительная плотность;

n — показатель степени ($5,0...7,5$ для асфальтобетонов).

При снижении относительной плотности всего на 2 % (с 0,98 до 0,96) усталостная долговечность уменьшается в $1,7...2,3$ раза [21].

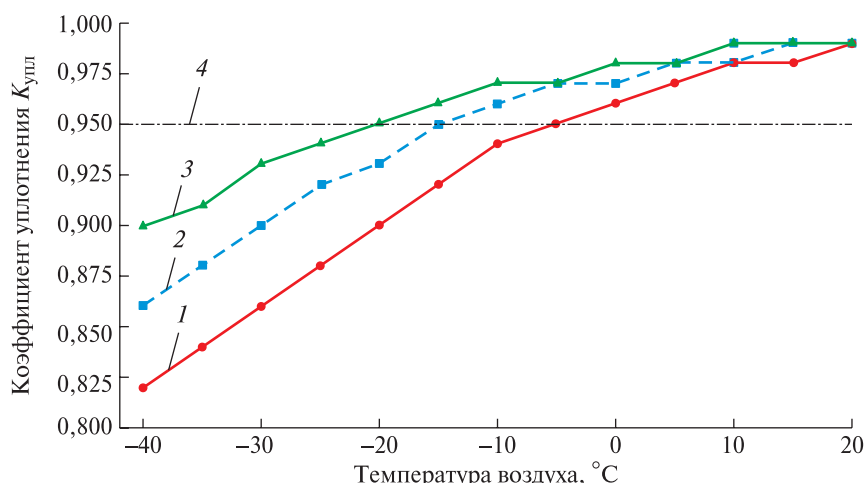


Рис. 2. Зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси от температуры воздуха и типа катка: 1 — стандартный каток (без подогрева); 2 — вибрационный каток; 3 — каток с подогревом вальцов; 4 — нормативное значение коэффициента уплотнения $K_{упл} = 0,95$

Fig. 2. Relationship between the compaction coefficient of asphalt concrete mix and air temperature and roller type: 1 — standard roller (unheated); 2 — vibratory roller; 3 — roller with heated drums; 4 — standard value of the compaction coefficient $K_{упл} = 0,95$

Снижение плотности оказывает мультипликативный эффект на долговечность: помимо прямого влияния на усталостные характеристики повышенная пористость увеличивает водопроницаемость покрытия и интенсивность окислительного старения битумного вяжущего. Скорость окисления битума в порах покрытия пропорциональна содержанию воздушных пустот и описывается кинетическим уравнением первого порядка. В результате совместного действия указанных факторов реальное снижение долговечности при уменьшении плотности на 2 % может достигать 3,0...4,0 раз с учетом ускоренного старения вяжущего [22].

Недоуплотнение является следствием быстрого остывания смеси и увеличения ее вязкости до уровня, при котором стандартное уплотняющее оборудование не обеспечивает необходимую плотность. Коэффициент уплотнения ниже нормативного значения 0,95 был зафиксирован в 68 % обследованных участков, построенных при температуре ниже -20°C [23].

Технологии уплотнения асфальтобетонной смеси при отрицательных температурах. Процесс уплотнения горячей АБС ограничен температурным интервалом от начальной температуры укладки до минимальной температуры уплотнения. Допустимое время уплотнения определяется по закону охлаждения

$$t_{упл} = -\frac{1}{k} \cdot \ln \left[\frac{(T_{упл.мин} - T_{окр})}{(T_{укл} - T_{окр})} \right], \quad (5)$$

где $T_{упл.мин}$ — минимальная температура уплотнения ($\approx 80^{\circ}\text{C}$ для стандартных смесей, $\approx 60^{\circ}\text{C}$ для модифицированного ПБВ); $T_{укл}$ — температура смеси при укладке, $^{\circ}\text{C}$; k — коэффициент теплоотдачи, зависящий от толщины слоя, скорости ветра и наличия теплозащиты [24].

Экспериментальные исследования проведены на опытных участках при температуре воздуха от -10 до -40°C с использованием трех типов уплотняющего оборудования: стандартного статического катка массой 10 т, вибрационного катка массой 8 т и катка с подогреваемыми вальцами. На каждом опытном участке длиной 100 м уплотнение проводилось в 6–10 проходов катка с контролем плотности после каждого двух проходов методом неразрушающего контроля (радиоизотопным плотномером ПГП-1). Температура смеси измерялась контактными термодатчиками на глубине 0, 20 и 40 мм от поверхности. Скорость ветра фиксировалась портативным анемометром на высоте 1,5 м от поверхности покрытия [25]. Относительная влажность воздуха в период проведения экспериментов составляла 65...85 %. Для каждого сочетания факторов (температуры воздуха, типа катка, типа смеси) выполнено не менее трех повторностей, что обеспечило статистическую достоверность результатов при доверительной вероятности 0,95.

Из рис. 2 следует, что стандартный статический каток не обеспечивает нормативного

коэффициента уплотнения (0,95) при температуре воздуха ниже -15°C . Вибрационный каток расширяет границу применимости до -22°C , а каток с подогревом вальцов — до -32°C .

Анализ кривых уплотнения показал, что динамика набора плотности при отрицательных температурах существенно отличается от нормальных условий. Если при положительной температуре основной прирост плотности (70...80 % конечного) достигается за первые 4...6 проходов катка, то при температуре -25°C эффективными являются лишь первые 2...3 прохода, после чего смесь остывает до состояния, при котором дальнейшее уплотнение приводит к разрушению структуры материала и снижению прочности. Критическую вязкость смеси, при которой уплотнение становится неэффективным, можно оценить по формуле

$$\eta_{\text{кр}} = \frac{P}{v_{\text{д}} \cdot h \cdot K_{\text{ф}}}, \quad (6)$$

где P — контактное давление катка, Па;

$v_{\text{д}}$ — скорость деформирования, с^{-1} ;

h — толщина уплотняемого слоя, м;

$K_{\text{ф}}$ — коэффициент формы контактного пятна (0,7...0,9).

При вязкости смеси выше $\eta_{\text{кр}}$ работа катка затрачивается на упругие деформации и разрушение структурных связей, а не на необратимое уплотнение [26].

Для повышения эффективности уплотнения при экстремально низкой температуре разработана комбинированная технология, включающая в себя предварительный разогрев уплотняемого слоя инфракрасными нагревателями, установленными на раме впереди катка. Мощность инфракрасного излучения, необходимая для поддержания температуры поверхности слоя выше минимально допустимой, определяется из теплового баланса

$$Q_{\text{ИК}} = q_{\text{конв}} + q_{\text{рад}} + q_{\text{осн}} = [\alpha(T_n - T_{\text{с}}) + \varepsilon\sigma(T_n^4 - T_{\text{с}}^4) + q_{\text{осн}}] \cdot S, \quad (7)$$

где $Q_{\text{ИК}}$ — требуемая тепловая мощность инфракрасных нагревателей, Вт;

$q_{\text{конв}}$, $q_{\text{рад}}$, $q_{\text{осн}}$ — конвективный, радиационный (от ИК-излучателя) и кондуктивный тепловые потоки, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

ε — степень черноты поверхности АБС (0,90...0,95);

σ — постоянная Стефана — Больцмана;

S — площадь обогрева, м^2 .

Расчеты показывают, что при температуре воздуха -30°C и скорости ветра 5 м/с, требуемая удельная мощность ИК-нагревателей составляет 8...12 кВт/м², что реализуемо при

использовании газовых ИК-горелок, монтируемых на раме катка.

Зависимость коэффициента уплотнения от разности температур подогреваемого вальца и смеси имеет вид

$$K_{\text{упл}} = K_{\text{упл},0} + \Delta K \cdot (1 - e^{-\beta \Delta T}) \quad (8)$$

где $K_{\text{упл},0}$ — коэффициент уплотнения стандартным катком;

ΔK — максимальный прирост коэффициента за счет подогрева (0,06...0,10);

β — параметр интенсивности подогрева, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔT — разность температуры вальца и смеси, $^{\circ}\text{C}$.

Помимо температуры вальца на эффективность уплотнения существенно влияет скорость движения катка. При отрицательной температуре рекомендуется снижение скорости укатки до 2–3 км/ч (против 4–5 км/ч при нормальных условиях), что увеличивает время контакта вальца со смесью и повышает глубину прогрева. Удельная работа уплотнения при зимнем строительстве определяется зависимостью

$$A_{\text{упл}} = \frac{P \cdot n \cdot L}{v \cdot B \cdot h}, \quad (9)$$

где P — линейное давление катка, кН/м;

n — число проходов;

L — длина захватки, м;

v — скорость движения катка, м/с;

B — ширина уплотняемой полосы, м;

h — толщина уплотняемого слоя, м.

Экспериментально установлено, что при температуре воздуха -25°C требуется увеличение удельной работы уплотнения в 1,8...2,2 раза по сравнению с нормальными условиями для достижения нормативного коэффициента уплотнения [27].

Набор прочности оснований дорожных одежд при низких температурах. Для дорог малой интенсивности широко применяются цементогрунтовые и цементоминеральные основания, набор прочности которых при отрицательных температурах существенно замедляется. Кинетика набора прочности описывается экспоненциальной зависимостью

$$R(t) = R_{28} \cdot (1 - e^{-at}), \quad (10)$$

где $R(t)$ — прочность цементогрунта на сжатие в возрасте t , сут., МПа;

R_{28} — марочная прочность (28 сут. при температуре $+20^{\circ}\text{C}$), МПа;

a — параметр скорости твердения, сут.^{-1} , зависящий от температуры и наличия добавок.

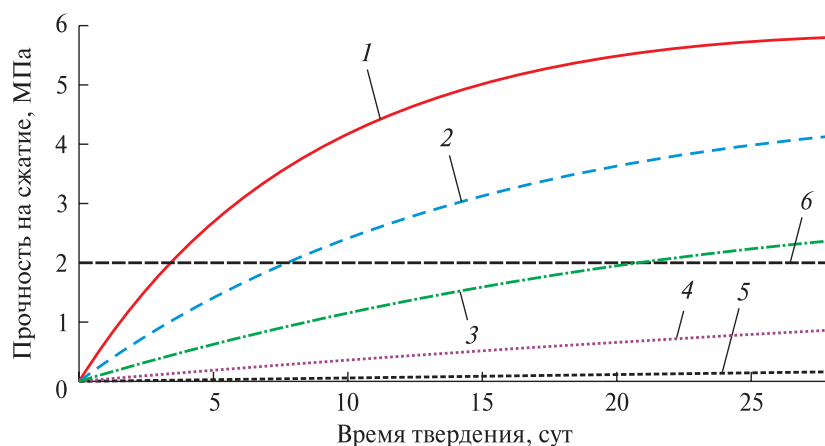


Рис. 3. Прочность цементогрунтового основания при различной температуре: 1 — $T_{\text{окр}} = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (без добавок); 2 — $T_{\text{окр}} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NaCl + CaCl₂); 3 — $T_{\text{окр}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NaCl + CaCl₂); 4 — $T_{\text{окр}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NaCl + CaCl₂); 5 — $T_{\text{окр}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (без добавок); 6 — минимальная прочность для движения (2 МПа)

Fig. 3. Strength of a cement-stabilised sub-base at different temperatures: 1 — $T_{\text{окр}} = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (without additives); 2 — $T_{\text{окр}} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NaCl + CaCl₂); 3 — $T_{\text{окр}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NaCl + CaCl₂); 4 — $T_{\text{окр}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NaCl + CaCl₂); 5 — $T_{\text{окр}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (without additives); 6 — minimum strength required for traffic (2 МПа)

Параметр a связан с температурой по закону Аррениуса

$$a(T) = a_0 \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R \cdot T}\right], \quad (11)$$

где a_0 — предэкспоненциальный множитель;

E_a — энергия активации гидратации цемента (40...50 кДж/моль для портланд-цемента);

$R = 8,314\text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$;

T — абсолютная температура, К [28].

Из уравнения (11) следует, что при снижении температуры от $+20$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость гидратации уменьшается в 4,5...6,0 раз, а при -20 — в 12...18 раз. Однако необходимо учитывать, что при отрицательной температуре в системе протекают два конкурирующих процесса: замедление химической реакции гидратации и кристаллизация поровой воды, приводящая к созданию внутренних напряжений в формирующейся структуре цементного камня. Давление кристаллизации льда определяется уравнением Клапейрона — Клаузиуса

$$\Delta P = \frac{L_{\phi} \cdot \Delta T}{T_0 \cdot \Delta v}, \quad (12)$$

где L_{ϕ} — удельная теплота фазового перехода воды (334 кДж/кг);

ΔT — переохлаждение ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

$T_0 = 273\text{ К}$;

Δv — разность удельных объемов льда и воды ($0,09 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{кг}$).

При температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление кристаллизации составляет около 13,6 МПа, что сопоставимо с прочностью формирующегося цементогрунта и может вызывать микротрещинообразование в структуре основания [29].

Применение противоморозных добавок (NaCl + CaCl₂ в количестве 3...7 % массы цемента) позволяет снизить температуру замерзания поровой влаги и обеспечить набор прочности при отрицательной температуре, хотя и с пониженной скоростью.

Из рис. 3 видно, что при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ с противоморозными добавками прочность через 28 сут. достигает 80 % относительно нормативной. При температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ этот показатель снижается до 58 %, а при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ — до 33 %. Без добавок при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ набор прочности практически прекращается, и через 28 сут. прочность составляет лишь 13 % относительно нормативной [30].

Для прогнозирования набора прочности при переменных температурных условиях (суточные колебания) используется метод зрелости бетона (maturity method). Эквивалентное время твердения при стандартной температуре определяется через температурную функцию

$$t_{\text{экв}} = \sum \exp\left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{реф}}} - \frac{1}{T_i}\right)\right] \cdot \Delta t_i, \quad (13)$$

где $t_{\text{экв}}$ — эквивалентное время при стандартной температуре $T_{\text{реф}} = 293\text{ К}$;

Т а б л и ц а 1

**Рекомендуемые составы противоморозных добавок в зависимости
от температуры для цементогрунтовых оснований
в зависимости от температуры**

**Recommended compositions of anti-freeze additives
for cement-soil sub-bases depending on temperature**

Температура, °C	Состав добавки	Дозировка, %	$\frac{R_{28}}{R_{28+20}^0}$	Характеристика
-5...-10	NaCl	3...4	0,75...0,80	Умеренный
-10...-20	NaCl + CaCl ₂ (1:1)	5...6	0,50...0,65	Оптимальный
-20...-30	CaCl ₂ + KCO ₃ (2:1)	6...8	0,30...0,45	Усиленный
-30...-40	CaCl ₂ + Na ₂ SO ₄ + + противоморозная добавка	8...10	0,20...0,30	Специальный режим

T_i — средняя температура в i -м интервале времени Δt_i ;

E_a — энергия активации.

Метод зрелости бетона позволяет прогнозировать момент достижения требуемой прочности основания с погрешностью не более 10...15 %, что существенно повышает точность планирования строительных работ. Данный метод особенно эффективен при значительных суточных колебаниях температуры, характерных для весенне-осеннего переходного периода в регионах Сибири [31].

Практическая реализация метода зрелости бетона предполагает установку температурных датчиков в толщу свежесложенного цементогрунтового основания на стадии устройства конструктивного слоя. Данные о температуре непрерывно передаются по беспроводному каналу (LoRaWAN или GSM) на сервер мониторинга, где автоматически рассчитывается текущая степень зрелости и прогнозируется момент достижения проектной прочности. Стоимость оснащения 1 км дороги датчиками зрелости составляет 15...25 тыс. руб., что пренебрежимо мало по сравнению с потенциальным ущербом от преждевременной нагрузки основания, не набравшего требуемой прочности.

Рекомендуемые дозировки противоморозных добавок в зависимости от температурного диапазона приведены в табл. 1.

Эффективность противоморозных добавок зависит не только от температуры, но и от минералогического состава грунта. Для глинистых грунтов с высоким содержанием монтмориллонита (более 15 %) дозировку добавок необходимо увеличивать на 20...30 % вследствие адсорбции солей глинистыми минералами. Для песчаных и супесчаных грунтов, напротив, эффективность добавок максимальна, и набор прочности при температуре -15 °C

может достигать 70...75 % от нормативной. Оптимальное водоцементное отношение при зимнем строительстве рекомендуется принимать на 10...15 % ниже стандартного для компенсации замедления гидратации.

Хлоридные противоморозные добавки оказывают долгосрочное воздействие на коррозионную стойкость цементогрунтового основания. Ионы хлора, поступающие в раствор из NaCl и CaCl₂, способствуют образованию хлоралюминатов кальция (соли Фриделя), что в целом положительно влияет на структурообразование, однако при концентрации хлорида натрия NaCl свыше 5 % наблюдается повышение сульфатной агрессии к цементному камню. Для оснований дорог V категории, функционирующих в условиях периодического увлажнения, рекомендуется ограничивать содержание хлоридных добавок до 4 % и применять комплексные составы с добавлением суперпластификатора С-3 в количестве 0,3...0,5 % массы цемента для компенсации снижения подвижности смеси при низкой температуре.

Допустимое время выполнения технологических операций. Одним из ключевых параметров зимнего строительства является допустимое время выполнения каждой технологической операции, ограниченное скоростью остывания материалов. Суммарное допустимое время от выгрузки смеси до завершения уплотнения определяется неравенством

$$t_{\text{укл}} + t_{\text{упл}} \leq t_{\text{доп}} = -\frac{1}{k} \cdot \ln \left[\frac{T_{\text{мин}} - T_{\text{окр}}}{T_0 - T_{\text{окр}}} \right], \quad (14)$$

где $t_{\text{укл}}$ — время укладки слоя, мин;

$t_{\text{упл}}$ — время уплотнения до нормативной плотности, мин;

$T_{\text{мин}}$ — минимальная температура завершения уплотнения, °C.

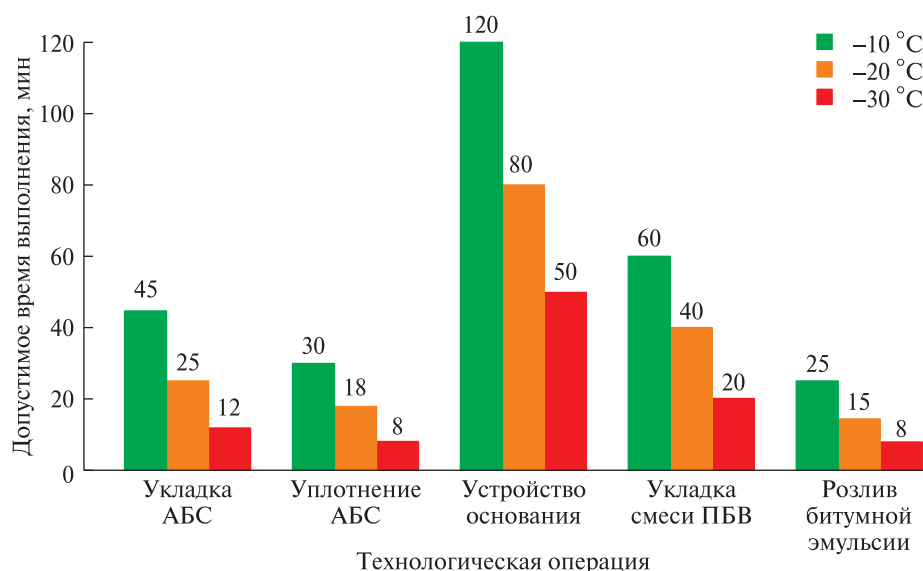


Рис. 4. Допустимое время выполнения технологических операций при различных значениях температуры воздуха

Fig. 4. The permissible time for performing technological operations at various air temperature values

При температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ допустимое время укладки АБС составляет лишь 12 мин., а уплотнения — 8 мин (рис. 4). Это требует высокой организации строительного процесса: сокращения длины захватки, увеличения числа единиц техники и синхронизации операций. Для устройства оснований допустимое время существенно больше (50 мин. при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$), что связано с меньшей чувствительностью грунтоцементных смесей к температуре.

Существенное влияние на допустимое время технологических операций оказывает скорость ветра. Коэффициент теплоотдачи k в формуле (14) зависит от скорости ветра по эмпирической зависимости

$$k(v_v) = k_0 \cdot (1 + 0,3 \cdot v_v^{0,6}), \quad (15)$$

где k_0 — коэффициент теплоотдачи при штиле;
 v_v — скорость ветра, м/с.

При ветре 10 м/с коэффициент теплоотдачи увеличивается в 1,9 раза, что сокращает допустимое время операций почти вдвое. Поэтому при скорости ветра свыше 8 м/с и температуре ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ строительство асфальтобетонного покрытия без применения ветрозащитных экранов следует признать нецелесообразным. Применение мобильных ветрозащитных экранов высотой 3–4 м снижает эффективную скорость ветра в зоне укладки в 2,5...3,0 раза и увеличивает допустимое время операций на 35...50 %.

Дополнительным фактором, влияющим на тепловой режим укладки, является предва-

рительный подогрев основания. При укладке АБС на промерзшее основание происходит интенсивный отвод теплоты через нижнюю поверхность слоя. Тепловой поток от смеси к основанию описывается выражением

$$q_{\text{осн}} = \lambda_{\text{осн}} \frac{T_{\text{см}} - T_{\text{осн}}}{\delta_k}, \quad (16)$$

где $q_{\text{осн}}$ — плотность теплового потока, Вт/м²;
 $\lambda_{\text{осн}}$ — теплопроводность основания, Вт/(м·К);
 $T_{\text{см}}$ — температура смеси;
 $T_{\text{осн}}$ — температура основания;
 δ_k — толщина контактного слоя, м.

При температуре основания $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и смеси $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ тепловой поток через контактную зону достигает значений 800...1200 Вт/м², что приводит к образованию прослойки некачественно уплотненного материала толщиной 10...15 мм в нижней части покрытия. ИК-основания до температуры $-5\text{...}-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед укладкой снижает тепловые потери через нижнюю грань на 60...70 %.

Применение смесей на основе ПБВ увеличивает допустимое время выполнения операций на 40...60 % благодаря снижению минимальной температуры уплотнения до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что делает данное решение одним из наиболее эффективных для зимнего строительства дорог малой интенсивности [32].

Механизм действия ПБВ-модификации заключается в формировании полимерной сетки в объеме полимерно-битумного вяжущего, которая сохраняет эластичность при низкой

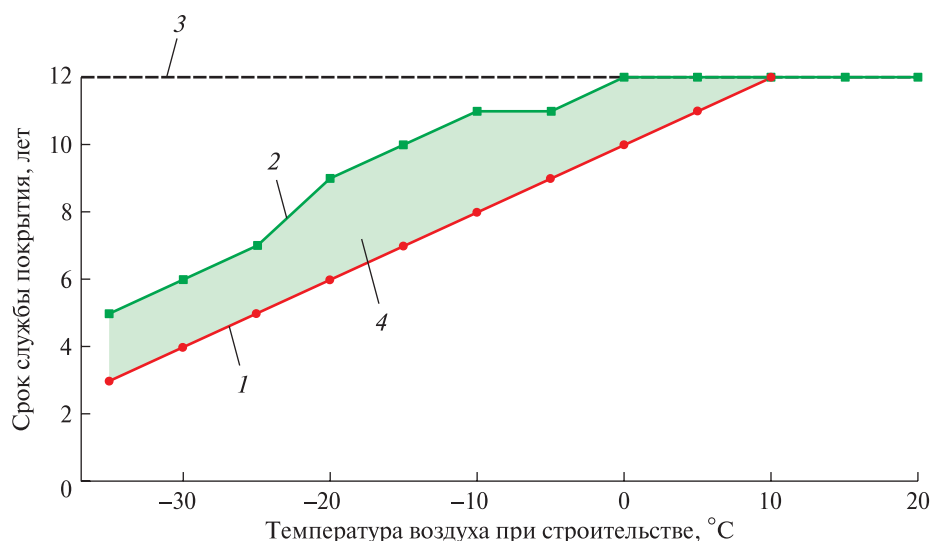


Рис. 5. Влияние температуры строительства на срок службы покрытия дорог малой интенсивности: 1 — стандартная технология; 2 — оптимизированная технология; 3 — проектный срок службы; 4 — эффект оптимизации

Fig. 5. Effect of construction temperature on the service life of low-traffic road surfacing: 1 — standard method; 2 — optimised method; 3 — design service life; 4 — optimisation effect

температуре и препятствует хрупкому разрушению. Температура хрупкости битума при модификации полимером SBS снижается с $-15 \dots -20$ °C (для немодифицированного БНД 60/90) до $-30 \dots -35$ °C, что существенно расширяет температурный диапазон укладки, а также обеспечивает смесям повышенную когезионную прочность при низких температурах, снижающую склонность к образованию температурных трещин на 35...50 % по сравнению со стандартными составами.

Влияние температуры строительства на долговечность покрытия. Долговечность дорожного покрытия, построенного при отрицательной температуре, определяется совокупным влиянием начальных дефектов (недоуплотнения, трещин) и условий последующей эксплуатации. Прогнозируемый срок службы оценивается по модифицированной зависимости

$$T_{\text{сл}} = T_{\text{пр}} \cdot K_T \cdot K_{\text{упл}} \cdot K_{\text{тр}} \quad (17)$$

где $T_{\text{пр}}$ — проектный срок службы, лет (12 лет для IV–V категорий);

K_T — температурный коэффициент (0,6...1,0);

$K_{\text{упл}}$ — коэффициент качества уплотнения (0,7...1,0);

$K_{\text{тр}}$ — коэффициент трещиностойкости (0,75...1,0).

Из рис. 5 следует, что при стандартной технологии, строительство при температуре -30 °C сокращает срок службы покрытия до 4 лет (33 %

относительно проектного). Оптимизированная технология (теплоизоляция, подогрев катков, смеси ПБВ, противоморозные добавки) позволяет увеличить срок службы до 6 лет (50 % относительно проектного) при тех же температурных условиях. Наибольший эффект оптимизации наблюдается в диапазоне $-25 \dots -15$ °C, где прирост составляет 2–3 года [33].

Для количественного прогнозирования долговечности покрытия с учетом условий строительства предлагается модифицированная модель накопления повреждений. Индекс поврежденности покрытия D в произвольный момент эксплуатации определяется суммированием элементарных повреждений от транспортной нагрузки и климатических воздействий

$$D(t) = D_0 + \Sigma \left(\frac{N_i}{N_{f,i}} \right) + \gamma \cdot \Sigma \left(\frac{\Delta T_j}{\Delta T_{\text{кр}}} \right)^m, \quad (18)$$

где D_0 — начальный уровень поврежденности, обусловленный дефектами строительства (0,05...0,30 в зависимости от температуры строительства);

N_i — число приложений нагрузки i -го типа;

$N_{f,i}$ — допустимое число приложений до разрушения;

γ — коэффициент климатического воздействия;

ΔT_j — температурный перепад j -го цикла;

$\Delta T_{\text{кр}}$ — критический температурный перепад;

m — показатель степени (2,5...3,5).

Т а б л и ц а 2

**Рекомендуемые технологии строительства дорог малой интенсивности
в зависимости от температуры**

Recommended technologies for low-intensity roads construction, depending on the temperature

$T_{\text{окр}}, ^\circ\text{C}$	Тип покрытия	Основание	Особые требования
-5...-10	Горячий асфальтобетон тип Б, В	Цементогрунт + NaCl (3 %)	Вибрационный каток
-10...-20	Асфальтобетон на полимерно-битумном вяжущем, тип Б	Цементогрунт + NaCl/CaCl ₂ (5 %)	Подогрев вальцов, теплоизоляция
-20...-30	Литой асфальтобетон или асфальтобетон на полимерно-битумном вяжущем	Щебень + цементогрунт с противоморозной добавкой (7 %)	Теплоизолированный кузов автомобиля-самосвала, подогрев
-30...-40	Литой асфальтобетон (без уплотнения)	Щебеночное + геосинтетика	Комплексная теплозащита

Покрытие считается исчерпавшим ресурс при $D = 1,0$. Данная модель учитывает кумулятивный характер накопления повреждений и позволяет обосновать сроки назначения ремонтных работ.

Вероятностная оценка надежности покрытия выполнена методом статистического моделирования Монте-Карло с учетом случайного характера начальных дефектов, транспортной нагрузки и климатических воздействий. Функция надежности покрытия, т. е. вероятность безотказной работы в течение времени t , аппроксимируется распределением Вейбулла

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (19)$$

где η — характеристический срок службы, лет;
 β — параметр формы (1,8...2,5 для дорог малой интенсивности).

Моделирование показало, что для покрытий, построенных при температуре -25°C по стандартной технологии, параметр составляет $\eta = 5,2$ года, тогда как при применении оптимизированной технологии он возрастает до $\eta = 8,7$ лет, тогда вероятность безотказной работы в течение 5 лет составляет 0,62 и 0,88 соответственно, что подтверждает экономическую целесообразность дополнительных затрат на оптимизацию по сравнению со стандартной технологией.

Обобщенные рекомендации по выбору типа покрытия, основания и особых технологических требований в зависимости от температуры воздуха приведены в табл. 2.

Помимо выбора типа покрытия и основания существенное значение имеет организация строительного процесса. При зимнем строи-

тельстве дорог малой интенсивности рекомендуется применение поточного метода с минимальной длиной захватки. Оптимальная длина захватки определяется из условия завершения всех операций в пределах допустимого времени

$$L_3 = v_{\text{укл}} \cdot t_{\text{доп}} \cdot K_{\text{орг}}, \quad (20)$$

где L_3 — длина захватки, м;

$v_{\text{укл}}$ — скорость укладки, м/мин;

$t_{\text{доп}}$ — допустимое время от начала укладки до завершения уплотнения, мин;

$K_{\text{орг}}$ — организационный коэффициент, учитывающий непроизводительные потери времени (0,6...0,8).

При температуре -25°C и скорости укладки 3 м/мин оптимальная длина захватки составляет 40...60 м, что требует высокой концентрации техники на ограниченном участке. Для сравнения, при $+10^\circ\text{C}$ длина захватки может достигать 200...300 м.

Синхронизация работы асфальтоукладчика и катков обеспечивается применением GPS-навигации и систем автоматизированного управления строительным потоком. Расстояние отставания катка от асфальтоукладчика при зимнем строительстве не должно превышать 15...25 м (против 50...80 м при нормальных условиях), что обеспечивает начало уплотнения при температуре смеси не ниже 130...140 $^\circ\text{C}$.

Экономическая эффективность оптимизированных технологий. Экономическая оценка различных вариантов технологий зимнего строительства выполнена для условий строительства дороги IV категории протяженностью 5 км при температуре -25°C . Целевая функция оптимизации имеет вид

$$C_{\text{жц}} = C_{\text{стр}} + C_{\text{сод}} + C_{\text{рем}} \rightarrow \min \quad (21)$$

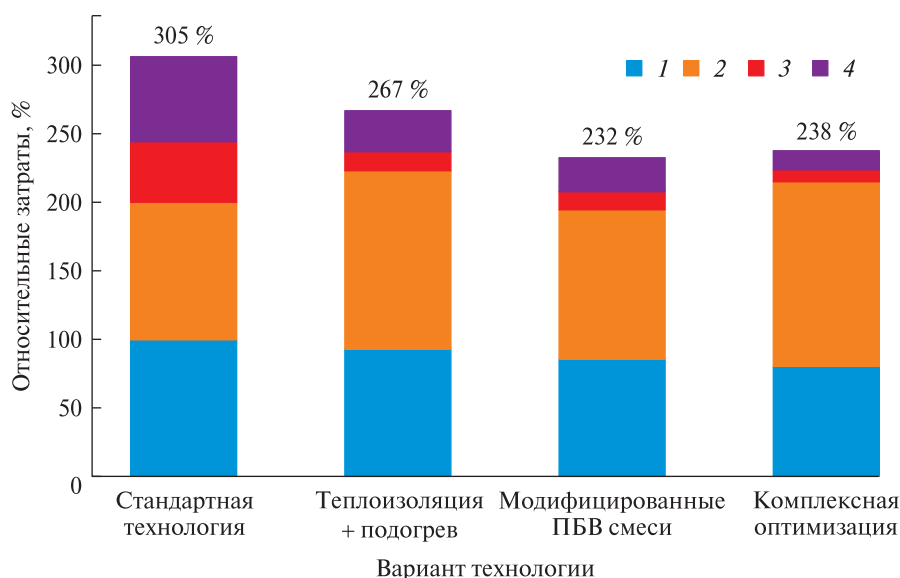


Рис. 6. Сравнение затрат на строительство дорог малой интенсивности при различных технологиях (при $T_{\text{окр}} = -25^\circ\text{C}$): 1 — материалы; 2 — техника и оборудование; 3 — перделка брака; 4 — гарантийный ремонт

Fig. 6. Comparison of construction costs for low-traffic roads using different technologies (at $T_{\text{окр}} = -25^\circ\text{C}$): 1 — materials; 2 — machinery and equipment; 3 — defects rectification; 4 — warranty repairs

где $C_{\text{жц}}$ — стоимость жизненного цикла;
 $C_{\text{стр}}$ — затраты на строительство;
 $C_{\text{сод}}$ — затраты на содержание;
 $C_{\text{рем}}$ — затраты на ремонт в течение расчетного срока (24 года) [34].

Данные рис. 6 показывают, что, несмотря на увеличение затрат на технику и оборудование (на 30...35 %), комплексная оптимизация обеспечивает снижение общих затрат на 20 % за счет кратного сокращения расходов на перделку брака (с 45 до 8 %) и гарантийный ремонт (с 60 до 15 %). Стоимость жизненного цикла оптимизированного варианта на 35...40 % ниже стандартного.

Наиболее экономически эффективным для диапазона $-20...-30^\circ\text{C}$ является применение модифицированных ПБВ смесей, которое при удорожании материалов на 10...15 % обеспечивает снижение стоимости жизненного цикла на 25...30 % за счет увеличения срока службы и снижения брака.

Дополнительным резервом повышения эффективности зимнего строительства является применение систем автоматизированного контроля температуры в режиме реального времени. Установка инфракрасных датчиков на асфальтоукладчике и катках позволяет непрерывно мониторить температуру смеси и автоматически корректировать скорость движения техники и число проходов катка. По данным опытного внедрения на объектах Тюменской

области, применение таких систем снижает долю участков с недоуплотнением на 40...55 % при одновременном сокращении расхода топлива катков на 12...18 % за счет исключения избыточных проходов на участках с достаточной температурой смеси.

Важным аспектом экономической оценки является учет социально-экономического ущерба от преждевременного разрушения покрытия. Для дорог малой интенсивности, обеспечивающих транспортную доступность отдаленных населенных пунктов и лесозаготовительных участков, вынужденные ограничения движения в период ремонта приводят к увеличению транспортных издержек пользователей на 25...40 %. С учетом косвенного ущерба совокупный экономический эффект от применения оптимизированных технологий зимнего строительства возрастает до 45...55 %, что существенно превышает прямую экономию на стоимости жизненного цикла дороги.

Анализ чувствительности экономической модели к основным параметрам показал, что наибольшее влияние на стоимость жизненного цикла оказывает коэффициент уплотнения покрытия (коэффициент эластичности 2,8), за которым следуют температура строительства (коэффициент 2,1) и содержание противоморозных добавок в основании (коэффициент 1,4). Это подтверждает приоритетность инвестиций в оборудование для обеспечения качественного

уплотнения (катки с подогревом, ветрозащитные экраны) по сравнению с другими мероприятиями. Срок окупаемости дополнительных затрат на комплект оборудования для зимнего строительства (каток с подогревом, ИК-нагреватели, ветрозащитные экраны) составляет 2–3 сезона при среднегодовом объеме работ не менее 10 км дорог.

Выводы

Установленные закономерности влияния низких температур на технологические процессы строительства дорог малой интенсивности позволили разработать рекомендации по совершенствованию соответствующих технологий.

Установлено, что среди дефектов покрытий, построенных в зимний период, преобладают температурные трещины (32 %) и недоуплотнение (24 %), их появление связано, соответственно, с высокими термическими напряжениями при резком охлаждении уложенной смеси и с сокращением времени, доступного для уплотнения при отрицательных температурах.

Показано, что стандартное уплотняющее оборудование не обеспечивает нормативного коэффициента уплотнения при температуре воздуха ниже -15°C ; каток с подогревом вальцов расширяет границу применимости до -32°C , а переход на смеси на основе ПБВ увеличивает допустимое время уплотнения на 40...60 %.

Противоморозные добавки на основе NaCl и CaCl_2 (5...7 % от массы цемента) обеспечивают набор прочности цементогрунтовых оснований при температуре до -25°C , хотя и со сниженной скоростью — 33...65 % от нормативной прочности за 28 сут.

При строительстве по стандартной технологии при -30°C срок службы покрытия сокращается до 4 лет (33 % от проектного); применение разработанного комплекса оптимизированных решений увеличивает этот показатель до 6 лет при одновременном снижении стоимости жизненного цикла на 35...40 %.

Для температуры ниже -30°C обоснована целесообразность применения литых асфальтобетонных смесей (АБС), не требующих механического уплотнения, в сочетании со щебеночными основаниями, армированными геосинтетическими материалами.

Разработанные математические модели теплового режима и набора прочности конструктивных слоев обеспечивают достаточно точный прогноз допустимых временных интервалов выполнения технологических операций с учетом комплекса климатических факторов —

температуры и скорости ветра, влажности воздуха. Предложенная модель накопления повреждений позволяет обоснованно назначать межремонтные сроки с учетом начального уровня поврежденности, формируемого условиями зимнего строительства.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку составов теплых асфальтобетонных смесей (WMA), адаптированных к условиям экстремально низких температур российских регионов, а также на создание автоматизированных систем управления строительным процессом, интегрирующих данные метеорологического мониторинга с алгоритмами оперативной корректировки технологических параметров.

Практическое значение полученных результатов подтверждается их апробацией на строительстве лесовозных дорог IV–V категорий в Ханты-Мансийском автономном округе и Республике Коми в зимний период 2023–2024 гг. На четырех опытных участках общей протяженностью 12 км, построенных с использованием рекомендованных технологий при температуре от -18 до -28°C , коэффициент уплотнения покрытия составил 0,96...0,98, водонасыщение — 2,8...3,5 %, что соответствует нормативным требованиям. Контрольное обследование через 12 мес. эксплуатации не выявило температурных трещин и участков с недопустимой ровностью покрытия ($\text{IRI} < 6,0$ м/км на всем протяжении), что подтверждает эффективность предложенного комплекса технологических решений.

Список литературы

- [1] Горелышев Н.В., Полосин-Никитин С.М., Васильев А.П. Технология и организация строительства автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1992. 551 с.
- [2] Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков: Вища школа, 1977. 116 с.
- [3] ГОСТ 9128–2013. Смесей асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 40 с.
- [4] Радовский Б.С. Основы теории остывания асфальтобетонных смесей // Автомобильные дороги и мосты, 2008. № 1. С. 24–31.
- [5] ГОСТ Р 58831–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия асфальтобетонные. Общие правила устройства при неблагоприятных погодных условиях. М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.
- [6] Иванова А.А. Температурный режим и другие простые правила как залог успеха при строительстве дорожных одежд // Молодой ученый, 2016. № 2 (106). С. 142–145.
- [7] Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М.: Транспорт, 1992. 254 с.

- [8] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
- [9] Taylor H.F.W. Cement Chemistry. London: Thomas Telford, 1997, 459 p.
- [10] Кочетков А.В., Боброва Т.В. Оптимизация транспортно-логистических процессов в дорожном строительстве // Вестник СибАДИ, 2019. Т. 16. № 3. С. 326–335.
- [11] ГОСТ Р 58406.2–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
- [12] Веренко В.А. Дорожные асфальтобетонные покрытия. Минск: Навука і тэхніка, 1993. 176 с.
- [13] СНиП 3.06.03–85. Автомобильные дороги / Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 112 с.
- [14] ГОСТ 22245–90. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1991. 8 с.
- [15] Petersen J.C. A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation // Transportation Research Circular E-C140, 2009, 78 p.
- [16] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Теоретическое обоснование оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозной автомобильной дороги по показателю маршрутной скорости движения // Системы. Методы. Технологии, 2020. № 3(47). С. 88–94
- [17] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 06–07 июня 2022 г. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [18] Прокопец В.С. Совершенствование методов оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2022. 22 с.
- [19] Козлов В.Г. Анализ существующих методов проектирования трассы лесных автомобильных дорог // Фундаментальные исследования, 2017. № 3. С. 35–39.
- [20] Орлов А.О., Мацнев М.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Могутнов Р.В. Обзор методов оптимизации состава машин при строительстве автомобильных дорог // Бюллетень транспортной информации, 2019. № 5 (287). С. 14–17.
- [21] Золотарь И.А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1974. 248 с.
- [22] Бурмистрова О.Н., Пильник Ю.Н., Сушков С.И. Проектирование лесных автомобильных дорог в системе CREDO ДОРОГИ. Ухта: Изд-во УГТУ, 2016. 103 с.
- [23] Григорьев В.В., Сафиуллин Р.Р., Сафиуллина С.А. Оптимизация структуры организации грузовой работы // Транспорт Урала, 2005. № 2 (5). С. 23–26.
- [24] Никитин В.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Михайленко Е.В., Пильник Ю.Н., Козлов Д.Г., Сапелкин Р.С. Математическое обоснование влияния вида рубки главного пользования на удельные затраты // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 2. С. 110–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-110-119
- [25] Пуркин В.И. Основы автоматизированного проектирования автомобильных дорог. М.: Изд-во МАДИ, 2000. 141 с
- [26] Золотарь И.А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1974. 248 с.
- [27] Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
- [28] Подольский В.П., Ковалев Н.С., Яковлев Е.В., Слепцова О.В. Исследование возможности применения металлизированных углеродных волокон в качестве структурирующей добавки в дорожный асфальтобетон // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Строительство и архитектура, 2013. № 4 (32). С. 62–69.
- [29] Брехман А.И. Системотехнические основы организации труда строительных бригад. М.: Изд-во Фонда «Новое тысячелетие», 2002. 768 с.
- [30] Григорьев В.В., Сафиуллин Р.Р., Сафиуллина С.А. Оптимизация структуры организации грузовой работы // Транспорт Урала, 2005. № 2 (5). С. 23–26.
- [31] Афанасьев В.А. Поточная организация строительства. Л.: Стройиздат, 1990. 292 с.
- [32] Томаев Б.М. Надежность строительного потока. М.: Стройиздат, 1983. 129 с.
- [33] Белецкий Б.Ф. Технология и механизация строительного производства. СПб.: Лань, 2021. 752 с.
- [34] Бойков В.Н., Федотов Г.А., Пуркин В.И. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог (на примере IndorCAD/Road). М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2005. 224 с.
- [35] Спектор М.Д. Современная теория землеустройства. М.: Изд-во РосНОУ, 2019. 132 с.

Сведения об авторах

Скрипников Алексей Васильевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ВГУИТ), skrypnikovvsafe@mail.ru

Тихомиров Петр Викторович — д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (БГИТУ), tikhomirov23@mail.ru

Мэрсон Вера Эдуардовна — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ВГУИТ), meerson@yandex

Кисель Юрий Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (БГИТУ), kisel2016@mail.ru

Савченко Илона Игоревна — ст. преп., ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ВГУИТ), ilona.savchenko.2016@mail.ru

Пискарев Дмитрий Александрович — аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ВГУИТ), dima.piskarev@bk.ru

Поступила в редакцию 16.04.2026.

Одобрено после рецензирования 08.06.2026.

Принята к публикации 10.09.2026.

IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION TECHNOLOGIES FOR LOW-INTENSITY HAULAGE ROADS IN LOW-TEMPERATURE CONDITIONS

**A.V. Skripnikov¹, P.V. Tikhomirov², V.E. Merson¹,
Y.E. Kisel², I.I. Savchenko¹, D.A. Piskarev¹**

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolutsii av., 394036, Voronezh, Russia

²Bryansk State Engineering and Technological University, 3, Stanke Dimitrov av., 241037, Bryansk, Russia

ilona.savchenko.2016@mail.ru

The article addresses the improvement of construction technologies for low-traffic roads (up to 1000 vehicles/day) under low-temperature conditions (–10 to –40 °C). Patterns of asphalt mixture compaction at subzero temperatures are investigated, and strength development of cement-stabilized bases with antifreeze additives is analyzed. Mathematical models for allowable time of technological operations considering heat losses have been developed. The impact of construction temperature on pavement durability is assessed, and recommendations for optimizing construction processes are proposed.

Keywords: low-traffic roads; winter construction, low temperatures, compaction, cement-stabilized base, antifreeze additives, pavement durability; technology optimization

Suggested citation: Skripnikov A.V., Tikhomirov P.V., Merson V.E., Kisel' Y.E., Savchenko I.I., Piskarev D.A. *Sovershenstvovaniye tekhnologiy stroitel'stva lesovoznykh dorog maloy intensivnosti v usloviyakh nizkikh temperatur* [Improvement of construction technologies for low-intensity haulage roads in low-temperature conditions]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 132–147. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-132-147

References

- [1] Gorelyshev N.V., Polosin-Nikitin S.M., Vasil'yev A.P. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva avtomobil'nykh dorog* [Technology and Organization of Highway Construction]. Moscow: Transport, 1992, 551 p.
- [2] Zolotarev V.A. *Dolgovechnost' dorozhnykh asfal'tobetonov* [Durability of Road Asphalt Concretes]. Kharkov: Vishcha Shkola, 1977, 116 p.
- [3] *GOST 9128–2013. Smesi asfal'tobetonnyye, polimerasfal'tobetonnyye, asfal'tobeton dlya avtomobil'nykh dorog i aerodromov. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 9128–2013 Asphalt Concrete, Polymer Asphalt Concrete, and Asphalt Concrete Mixtures for Highways and Airfields. Specifications]. Moscow: Standartinform, 2014, 40 p.
- [4] Radovskiy B.S. *Osnovy teorii ostyvaniya asfal'tobetonnykh smesey* [Fundamentals of the Theory of Cooling of Asphalt Concrete Mixtures]. *Avtomobil'nyye dorogi i mosty* [Highways and Bridges], 2008, no. 1, pp. 24–31.

- [5] GOST R 58831–2020. *Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya. Pokrytiya asfal'tobetonnyye. Obshchiye pravila ustroystva pri neblagopriyatnykh pogodnykh usloviyakh* [GOST R 58831–2020. Public Highways. Asphalt Concrete Pavements. General Rules for Construction under Adverse Weather Conditions]. Moscow: Standartinform, 2020, 16 p.
- [6] Ivanova A.A. *Temperaturnyy rezhim i drugiye prostyye pravila kak zalog uspekha pri stroitel'stve dorozhnykh odezhd* [Temperature Control and Other Simple Rules as the Key to Success in Road Construction]. Molodoy uchenyy [Young Scientist], 2016, no. 2 (106), pp. 142–145.
- [7] Rudenskiy A.V. *Dorozhnyye asfal'tobetonnyye pokrytiya* [Asphalt Concrete Road Pavements]. Moscow: Transport, 1992, 254 p.
- [8] Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Thermal Conductivity]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1967, 599 p.
- [9] Taylor H.F.W. *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford, 1997, 459 p.
- [10] Kochetkov A.V., Bobrova T.V. *Optimizatsiya transportno-logisticheskikh protsessov v dorozhnom stroitel'stve* [Optimization of Transport and Logistics Processes in Road Construction]. Vestnik SibADI, 2019, v. 16, no. 3, pp. 326–335.
- [11] GOST R 58406.2–2020. *Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya. Smesi goryachiye asfal'tobetonnyye i asfal'tobeton. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST R 58406.2–2020. Public Roads. Hot Asphalt Concrete Mixes and Asphalt Concrete. Specifications]. Moscow: Standartinform, 2020, 20 p.
- [12] Veren'ko V.A. *Dorozhnyye asfal'tobetonnyye pokrytiya* [Asphalt Concrete Road Pavements]. Minsk: [Science and Technology], 1993, 176 p.
- [13] SNiP 3.06.03–85. *Avtomobil'nyye dorogi* [SNiP 3.06.03–85 Highways. USSR Gosstroy]. Moscow: [TsITP Gosstroy USSR], 1986, 112 p.
- [14] GOST 22245–90. *Bitumy neftyanyye dorozhnyye vyazkiye. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 22245–90 Viscous petroleum road bitumens. Specifications]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1991, 8 p.
- [15] Petersen J.C. A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation. Transportation Research Circular E-C140, 2009, 78 p.
- [16] Garus I.A., Ogar P.M., Runova Ye.M. *Teoreticheskoye obosnovaniye otsenki transportno-ekspluatatsionnykh kachestv lesovoznoy avtomobil'noy dorogi po pokazatelyu marshrutnoy skorosti dvizheniya* [Theoretical justification for assessing the transport and operational qualities of a logging road based on the route speed indicator]. Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3(47), pp. 88–94.
- [17] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovaniye ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational condition of logging roads]. Energoeffektivnost' i energosberezheniye v sovremennom proizvodstve i obshchestve: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proc. of the Int. scientific-practical. conf.], Voronezh, June 6–7, 2022. Voronezh: [Publishing house of the Voronezh State Agrarian University], 2022, pp. 196–200.
- [18] Prokopets V.S. *Sovershenstvovaniye metodov otsenki transportno-ekspluatatsionnykh kachestv lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Improving methods for assessing the transport and operational qualities of logging roads]. Dis. Cand. Sci. (Tech.), 2022, 22 p.
- [19] Kozlov V.G. *Analiz sushchestvuyushchikh metodov proyektirovaniya trassy lesnykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of existing methods for designing forest road routes]. Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental Research], 2017, no. 3, pp. 35–39.
- [20] Orlov A.O., Matsnev M.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Mogutnov R.V. *Obzor metodov optimizatsii sostava mashin pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog* [Review of Methods for Optimizing the Composition of Machines in Highway Construction]. Byulleten' transportnoy informatsii [Transport Information Bulletin], 2019, no. 5 (287), pp. 14–17.
- [21] Zolotar' I.A. *Ekonomiko-matematicheskiye metody v dorozhnom stroitel'stve* [Economic and Mathematical Methods in Road Construction]. Moscow: Transport, 1974, 248 p.
- [22] Burmistrova O.N., Pil'nik YU.N., Sushkov S.I. *Proyektirovaniye lesnykh avtomobil'nykh dorog v sisteme CREDO DOROGE* [Design of Forest Highways in the CREDO ROADS System]. Ukhta: USTU Publishing House, 2016, 103 p.
- [23] Grigor'yev V.V., Safiullin R.R., Safiullina S.A. *Optimizatsiya struktury organizatsii gruzovoy raboty* [Optimization of the structure of the organization of freight operations]. Transport Urala [Transport of the Urals], 2005, no. 2 (5), pp. 23–26.
- [24] Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Mikhailenko E.V., Pilnik Yu.N., Kozlov D.G., Sapelkin R.S. *Matematicheskoye obosnovaniye vliyaniya vida rubki glavnogo pol'zovaniya na udel'nye zatraty* [Influence of final felling on costs per unit and its mathematical justification]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 110–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-110-119
- [25] Purkin V.I. *Osnovy avtomatizirovannogo proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog* [Fundamentals of automated design of highways]. Moscow: MADI Publishing House, 2000, 141 p.
- [26] Zolotar' I.A. *Ekonomiko-matematicheskiye metody v dorozhnom stroitel'stve* [Economic and Mathematical Methods in Road Construction]. Moscow: Transport, 1974, 248 p.
- [27] Isachenko A.G. *Landshaftovedeniye i fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye* [Landscape Science and Physical-Geographical Zoning]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1991, 366 p.
- [28] Podol'skiy V.P., Kovalev N.S., Yakovlev E.V., Sleptsova O.V. *Issledovaniye vozmozhnosti primeneniya metallizirovannykh uglerodnykh volokon v kachestve strukturiruyushchey dobavki v dorozhnyy asfal'tobeton* [Investigation of the possibility of using metallized carbon fibers as a structuring additive in road asphalt concrete]. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura [Scientific Herald of the Voronezh State Architectural and Construction University. Construction and architecture], 2013, no. 4 (32), pp. 62–69.
- [29] Brekhman A.I. *Sistemotekhnicheskiye osnovy organizatsii truda stroitel'nykh brigad* [Systems and Engineering Foundations of Labor Organization of Construction Crews]. Moscow: Izd-vo Fonda «Novoye tysyacheletiy» [Publishing House of the New Millennium Foundation], 2002, 768 p.

- [30] Grigor'yev V.V., Safiullin R.R., Safiullina S.A. *Optimizatsiya struktury organizatsii gruzovoy raboty* [Optimization of the structure of organizing cargo work]. Transport Urala [Transport of the Urals], 2005, no. 2 (5), pp. 23–26.
- [31] Afanas'yev V.A. *Potochnaya organizatsiya stroitel'stva* [Flow organization of construction]. Leningrad: Stroyizdat, 1990, 292 p.
- [32] Tomayev B.M. *Nadezhnost' stroitel'nogo potoka* [Reliability of the construction flow]. Moscow: Stroyizdat, 1983, 129 p.
- [33] Beletskiy B.F. *Tekhnologiya i mekhanizatsiya stroitel'nogo proizvodstva* [Technology and mechanization of construction production]. St. Petersburg: Lan', 2021, 752 p.
- [34] Boykov V.N., Fedotov G.A., Purkin V.I. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog (na primere IndorCAD/Road)* [Automated design of highways (using IndorCAD/Road as an example)]. Moscow: MADI (STU) Publishing House, 2005, 224 p.
- [35] Spektor M.D. *Sovremennaya teoriya zemleustroystva* [Modern theory of land management]. Moscow: RosNOU, 2019, 132 p.

Authors' information

Skrypnikov Aleksey Vasil'evich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information Security of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Tikhomirov Petr Viktorovich — Dr. Sci. (Tech.) of the Bryansk State Engineering and Technological University, tixomirov23@mail.ru

Merzon Vera Eduardovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Voronezh State University of Engineering Technologies, meerson@yandex.ru

Kisel' Yuriy Yevgen'yevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Bryansk State Engineering and Technological University, kisel2016@mail.ru

Savchenko Ilona Igorevna✉ — Senior Lecturer of the Voronezh State University of Engineering Technologies, ilona.savchenko.2016@mail.ru

Piskarev Dmitry Aleksandrovich — pg. of the Voronezh State University of Engineering Technologies, dima.piskarev@bk.ru

Received 16.04.2026.

Approved after review 08.06.2026.

Accepted for publication 10.09.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest