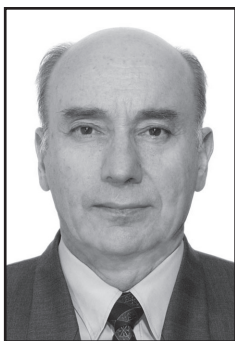




Композитные сооружения в тундре



Святослав ЛУЦКИЙ
Sviatoslav Ya. LUTSKY

Александр ЧЕРКАСОВ
Alexander M. CHERKASOV



Константин ХРИПКОВ
Constantine N. HRIPKOV

Луцкий Святослав Яковлевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

*Черкасов Александр Михайлович — кандидат технических наук, руководитель мерзлотной лаборатории МИИТ.
Хрипков Константин Николаевич — инженер МИИТ.*

В статье рассматриваются подходы к строительству железных дорог в условиях вечной мерзлоты. Показаны композитные технологии, разработанные в МИИТ для районов Ямала, Якутии, даются оценки связанным с этой областью научным исследованиям и инженерным разработкам.

Ключевые слова: инженерная экология, железная дорога, вечная мерзлота, криология, композитные технологии.

Строительство объектов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов связано с уникальными природными условиями. В тундре применяют технологию и организацию работ, ориентированных на почти полное отсутствие грунтов, пригодных для возведения насыпей, и наличие многолетнемерзлых болот. Из-за большой льдонасыщенности наблюдаются значительные деформации естественных склонов и откосов насыпей, термоэрозионные и солифлюкционные процессы. И следует учитывать всю совокупность природно-климатических, гидро-геологических и мерзлотных явлений, закономерности которых изучены и систематизированы в фундаментальных трудах [1–6]. Недостаточный учет их последствий может катастрофически повлиять и на ход строительства, и дальнейшую эксплуатацию объекта.

В экстремальных условиях строительства объектов транспорта на Севере особенно актуален выбор взаимосвязанных конструктивных, технологических и экологических решений, обеспечивающих надежность сооружений.

I.

Опыт экспертизы строительства и временной эксплуатации железных дорог Ягельная – Ямбург, Обская – Бованенково – Карская, Беркабит – Томмот – Якутск [4, 11] показал значимость безопасности сооружений, начиная со строительного периода. В ходе работ на многолетнемерзлых грунтах в зависимости от времени года и осадок меняются их физические свойства, что может потребовать изменения не только технологии, но и конструкции объектов.

Среди прогрессивных решений назовем разработанную в МИИТ *композитную технологию*, объединяющую возможности современных геосинтетических материалов, мобильной техники в северном исполнении, устройств для терморегулирования и приборного мониторинга процессов.

Природа деформаций насыпей в сложных инженерных условиях зависит от хода работ, формирования новой природно-технической системы и процессов, происходящих в грунтах при их промерзании-оттаивании. Деформации земляных сооружений происходят под влиянием комплекса теплофизических, физико-механических, массообменных и физико-химических факторов.

Обследование построенных участков новой железнодорожной линии Обская – Бованенково на Ямале вскрыло крайне негативные процессы деградации веками сложившейся мерзлоты на границе техногенного вмешательства в природу (насыпь-основание). Нарушение гидрологического режима поверхностных вод приводит к формированию подтопленных зон, образованию термокарста и разрушению водоотводных и водопропускных сооружений. Снегонакопления в полосе отвода стали участками отепляющего воздействия и изменили температурный баланс в мерзлой толще. Началось образование новых сквозных и несквозных таликовых зон.

Основные факторы, которые влияют на образование таликов: физические и теплофизические характеристики, влажность грунтов основания (послойно), климатические характеристики, снегазаносимость и уровень подтопляемости участка строительства. Для аналитической

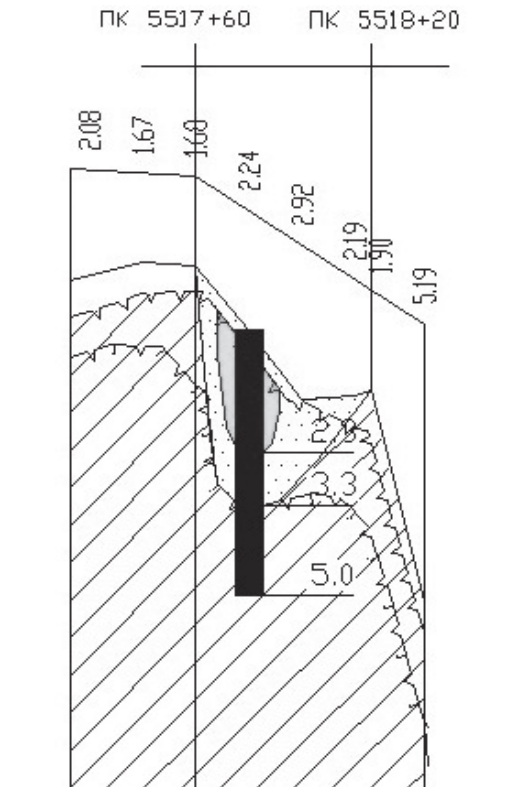


Рис. 1. Фрагмент продольного профиля с грунтовым разрезом фактического образования талика на ПК 5518 линии Бованенково – Карская.

стадии обследования грунтовые разрезы и характеристики грунтов на выбранных пикетах принимались по материалам проектов и мониторинга, организованных на опытных участках режимных сетей; климатические параметры – по данным наблюдений метеостанции Юрибей, ближайшей к участку трассы.

Результаты обследования подтвердили необходимость специальных конструктивно-технологических решений в отношении земляного полотна в таликовых зонах. По определению [6] талики – массивы талого грунта, залегающие внутри толщи многолетнемерзлых пород – являются источником нестабильности основания, деформаций земляных сооружений. Причина их появления – аномалии, вызывающие нарушение естественного температурного режима многолетнемерзлого слоя со льдистыми грунтами. Но возможны и другие причины, например, минерализация грунтов, понижающая температуру замерзания





(у проектировщиков есть даже термин – жидкая вечная мерзлота).

Динамика изменения состояния природно-технической системы, которой по праву становится новая железная дорога, приводит к появлению методов регулирования технологических процессов. Выбор конструктивно-технологических решений в процессе строительства зависит от вида таликовых зон: 1) фактически сложившихся; 2) потенциальных.

Традиционный подход к оценке формирования таликов [6,7] основан на сравнении глубины сезонного оттаивания и промерзания основания земляного полотна сверху и снизу при нулевой среднегодовой температуре и отсутствии значительных теплоточков на нижней границе потенциальных глубин оттаивания и промерзания.

На рис. 1 показан результат расчетов зоны образования таликов до начала строительного периода железнодорожной насыпи. Значения глубин промерзания и оттаивания грунта определены по формулам [3,4]:

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot T_s \cdot t_s}{L_v} + (\lambda_{th} + R_s)^2} - \lambda_{th} \cdot R_s$$

(1)

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s} + R_{ins}; \quad (2)$$

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot T_w \cdot t_w}{L_v} + (\lambda_f + R_w)^2} - \lambda_f \cdot R_w; \quad (3)$$

$$R_w = \frac{1}{\alpha_w} + R_{ins} + R_{snow}, \quad (4)$$

где λ_{th} , λ_f – коэффициент теплопроводности грунта насыпи в талом и мерзлом состоянии, Вт/(м·°C); T_s , T_w – среднелетняя и среднезимняя температура поверхности грунта в пределах основной площадки или откоса, °C; t_s , t_w – продолжительность летнего и зимнего периодов, ч; R_s , R_w – среднелетнее и среднезимнее термическое сопротивление теплообмену, м²·°C/Вт; α_s , α_w – коэффициенты теплообмена в летнее и зимнее время соответственно, Вт/(м²·°C); R_{ins} – термическое сопротивление изоляции, м²·°C/Вт; R_{snow} – среднезимнее термическое сопротивление снежного покрова;

Расчеты теплового баланса для участка на ПК 14584 + 00–14586 + 60 показали: из-за недостаточного зимнего промерзания грунта образование фактической таликовой зоны было неизбежным, ее надо устранить до завершения работ по земляному полотну. Проблема в том, чтобы не только зафиксировать таликовые зоны, но и принять все возможные меры по их ликвидации и профилактике уже в строительный период.

Свой вклад в решение проблемы подготовки производства на Ямале и в Якутии внесли ученые ИПСС МИИТ. Для ОАО «Ямалтрансстрой» был составлен технологический регламент строительства экспериментального участка раз. Хралов – ст. Сохонто, в котором предложено построить технологическую автодорогу в теле насыпи, обеспечивающую постоянный внутривозрастной транспорт с целью доставки грунта из при-трассовых карьеров, строительных материалов и конструкций [11].

II.

Концепция технологических регламентов состояла в разработке и реализации новой композитной технологии индивидуально для каждого вида опасных участков. Были выделены параметры закономерностей [8,9], которые допускают технологическое регулирование. К ним относятся: теплопроводность талого и мерзлого грунта основания (λ_m , λ_t), сумма градусо-часов за летний и зимний периоды на дневной поверхности; ($\Omega_{покp}^l$, $\Omega_{покp}^3$), годовой цикл (Т, ч); теплота фазового перехода промерзающего слоя (Qф).

Для ликвидации условий образования таликов в потенциально опасной зоне эффективно реализованы следующие стадии композитной технологии:

- устройство технологической автодороги (ТАД);
- установка сезонно-действующих охлаждающих термосифонов;
- регулирование толщины снежного покрова до возведения насыпей;
- устройство дренажных прорезей и регулирование влажности;
- интенсивная технология упрочнения основания.

Важно отметить, что каждая стадия включает комплекс процессов, увязанных

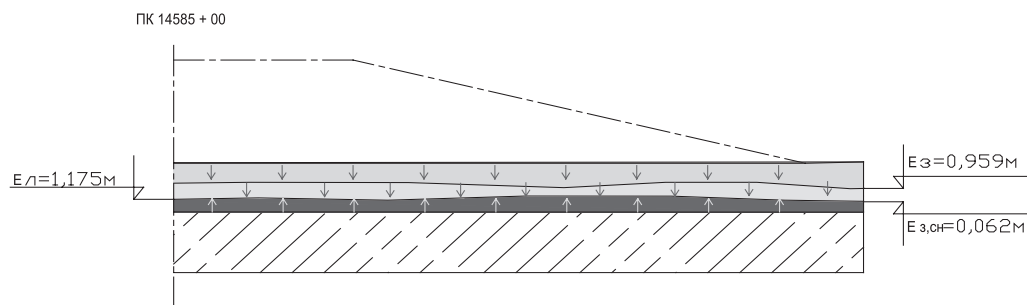


Рис. 2. Формирование таликовой зоны на участке ПК 14584 – ПК 14586 линии Обская – Карская.

во времени исполнения и по месту размещения на трассе линии, которые взаимодополняют и повышают воздействие на негативные явления в основании насыпей.

По каждой стадии были установлены физические и формальные взаимосвязи между природными и регулируемыми технологическими процессами. Для этого в расчетные конструктивные схемы введены параметры и факторы, допускающие изменения в ходе проектирования и строительного производства: виды покровов (промерзающие и непромерзающие, естественные и техногенные), характеристики конвективного теплообмена в породах (инфильтрация, конденсация) и др.

Проследим взаимосвязь технологических и физических параметров на отдельных стадиях.

Первая стадия композитной технологии и соответственно первый комплексный процесс – устройство технологической автодороги – является главным условием самой возможности строительного производства в криолитозоне из-за деградации деятельного слоя мерзлоты летом и снеготаносимости полосы отвода зимой.

Для предотвращения деформаций при оттаивании грунта в насыпи устраивают геотекстильные обоймы, в основание укладывается пенополистирол, главная площадка укрепляется георешеткой и скальным грунтом (расчетная высота конструкции не должна допускать сезонного оттаивания основания). В таком исполнении технологическая автодорога приобретает, во-первых, конструктивную функцию – становится ядром жесткости будущей постоянной насыпи железной дороги; во-вторых – организационную, так как обеспечивает внутритрассовый транспорт для

всех подрядных организаций на трассе и расстановку техники на рабочих участках к началу теплого периода. При положительных температурах завершается отсыпка железнодорожной насыпи до проектного очертания с использованием технологического автопроезда, укрепляются откосы и основная площадка земляного полотна.

Такая конструкция и динамика возведения ТАД противодействуют условиям образования таликов и устраняют опасные зоны. Сооружение ТАД производится в начале первого зимнего периода возведения насыпи, после подготовительных работ. Срок расчета исходя из продолжительности устройства технологической автодороги на типовой захватке 200 м – 5 дней.

Возможность выбора сроков выполнения каждого технологического процесса позволяет регулировать в ходе работ температурный режим грунтов основания, тем самым предотвращая образование таликовых зон в строительный период.

В наиболее опасных местах возникновения и развития термокарста – у откосов ТАД (рис. 3) предложено организовать терморегулирование мерзлотных процессов за счет сезонно-действующих охлаждающих устройств (термосифонов). Идея в том, чтобы уже при подготовке производства и негативном прогнозе растепления понизить температуру грунтов.

Воздействие термосифонов сочетается с теплоизоляцией от всей конструкции технологической автодороги, особенно от плит пенополистирола, устанавливаемых в ее основании.

Известен положительный опыт применения термосифонов в конструктивных решениях [7]. Охлаждение пластичномерзлых грунтов производится с целью превращения их в твердомерзлые и соответ-



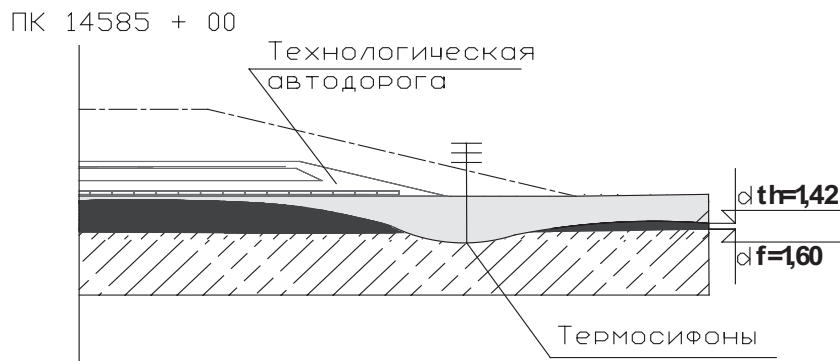


Рис. 3. Ход оттаивания и промерзания основания при устройстве ТАД и термосифонов.

ственно повышения их прочности и снижения деформационных свойств, а талых грунтов — с целью создания однородных мерзлотных условий на строительной площадке путем промораживания несквозных таликов.

В составе композитной технологии термосифоны должны выполнять регулируемую функцию. Их установка выполняется как в комплексе с сооружением ТАД, так и отдельно от него, но строго в тех местах, где присутствуют критические значения параметров образования таликов.

Термосифоны устанавливаются в пробуренные скважины вдоль ТАД вертикально, отклонение допускается на величину не более диаметра. Радиус замораживания сезонно-действующих установок у основания насыпи определяет шаг их расстановки вдоль трассы.

Регулируемым параметром при профилактике талика является термическое сопротивление снежного покрова R_{snow} на откосах ТАД и в полосе отвода. В работах [3,5] снежный покров выделен как фактор, участвующий в формировании температурного режима пород в холодных регионах. При этом влияние снега на температурное поле пород многообразно и может иметь разнонаправленный характер. Величина и направленность его зависят от высоты и теплопроводности, характера снегонакопления во времени, климатических условий, а также от годового теплообмена в подстилающих породах.

Так, при малых мощностях снежного покрова за счет повышения альбедо дневной поверхности снег может оказывать охлаждающее воздействие на температурный режим подстилающих пород. То же

самое может происходить и при больших значениях высоты снега за счет длительной задержки его схода и сокращения летнего нагрева основания насыпей. Однако главный фактор — снег как теплоизолятор, препятствующий охлаждению пород в пределах слоя годовых теплооборотов в зимний период. Опепляющее воздействие определяется его низкой теплопроводностью и сезонностью существования (только в холод) и может приводить к повышению среднегодовой температуры пород относительно таковой на дневной поверхности на величину до 10°C и более.

В соответствии с [7] теплоизоляция позволяет направленно управлять мерзлотными процессами в основании насыпи. Так, теплоизолятор, уложенный на откосах, уменьшает сезонное промерзание грунтов насыпи зимой и оттаивание летом (но не в равной степени). Увеличение термического сопротивления теплообмену поверхности насыпи в зимнее время меньше, чем в летнее из-за наличия снега. В результате промерзание будет больше, чем оттаивание, и в основании насыпи произойдет охлаждение грунтов. Если требуется найти критическую мощность снежного покрова, то вначале рассчитывается глубина летнего оттаивания пород, которая после вычисления потенциального годового промерзания снизу позволяет найти требуемую глубину зимнего промерзания сверху, а по этой величине обратным расчетом находится искомая критическая характеристика снежного покрова.

III.

Рассмотрим **вторую стадию** композитной технологии — устройство дренажа

и регулирование влажности основания. Ее выполняют на участках высокотемпературной мерзлоты при повышенной влажности слабых грунтов, подстилаемых прочным слоем. На этих участках ТАД устраивают на обходе основной трассы. Возможность и результативность регулирования зависят от организации контроля температур, влажности и осадок грунтов в процессе уплотнения. В соответствии с [3,6] изменение влажности ведет к изменению теплофизических свойств пород – теплопроводности и теплоемкости.

Исходя из частных решений задачи Стефана, полученных В. А. Кудрявцевым, зависимость глубины сезонного промерзания (протаивания) прямо пропорциональна корню квадратному из теплопроводности и несколько более сложная по отношению к теплоемкости. Лабораторные определения теплофизических свойств грунтов свидетельствуют об уменьшении коэффициента теплопроводности пород с увеличением их дисперсности. Поэтому при прочих равных условиях наибольшие глубины сезонного промерзания (протаивания) формируются в грубодисперсных породах, а наименьшие – в тонкодисперсных грунтах. Поскольку теплопроводность пород повышается с увеличением их плотности, то и этот фактор оказывает определенное влияние на изменение мощности сезонных талого и мерзлого слоев.

Изменение влажности пород влияет на глубину оттаивания двояко: во-первых, через изменение теплофизических свойств пород; во-вторых, через величину фазовых переходов воды.

Коэффициент теплопроводности дисперсных пород возрастает с увеличением их влажности, поскольку теплопроводность воды и льда выше, чем воздуха. Наиболее резкое увеличение теплопроводности талых пород наблюдается в диапазоне малых влажностей (до максимальной молекулярной влагоемкости) и продолжает увеличиваться с повышением влажности (до полной влагоемкости). Например, коэффициент теплопроводности песка в воздушносухом состоянии 0,30–0,35, а влагонасыщенном – 1,7–2,6 Вт/мК.

Согласно [3,6] изменение теплопроводности мерзлых пород в связи с изменением

влажности характеризуется своей зависимостью. При малых влажностях, близких максимальной молекулярной влагоемкости, образующиеся кристаллы льда ухудшают тепловые контакты между частицами минерального скелета и, если теплопроводность последних значительно выше теплопроводности льда (кварц, например), теплопроводность породы уменьшается. Во всех остальных случаях увеличение влажности (льдистости) мерзлых дисперсных пород ведет к увеличению их теплопроводности.

Казалось бы, и увеличение влажности породы ведет к увеличению глубин ее сезонного промерзания или протаивания. Однако наиболее сильно влажность породы влияет на глубину сезонного промерзания и протаивания через фазовые переходы влаги, доля которых может превышать половину общей годовой суммы теплооборотов. То есть глубина промерзания–оттаивания пород с увеличением влажности будет уменьшаться.

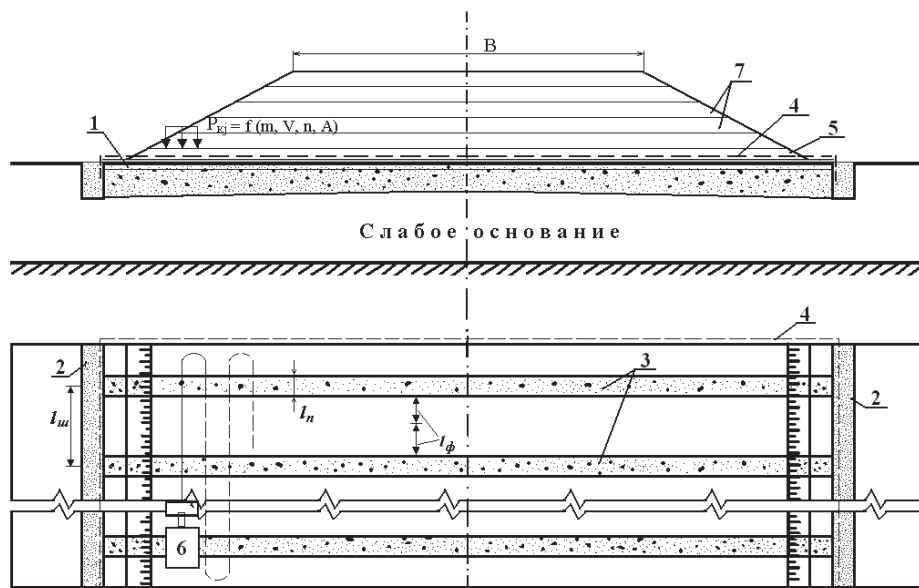
Рост глубины сезонного промерзания и протаивания наблюдается с увеличением влажности от 0 до некоторой величины $W_{нз}$. В этом интервале влага не замерзает при отрицательной температуре и породы остаются немерзлыми (охлажденными). С увеличением влажности свыше $W_{нз}$ возрастает доля фазовых переходов в общем теплообороте породы, и глубина их промерзания и протаивания уменьшается. Появляется значение критической влажности, при которой потенциально возможно рождение таликовых зон. Соответственно возникает необходимость и возможность регулирования влажности в строительный период для направленного улучшения теплового баланса в основании водонасыщенных грунтов.

Для таких крайне сложных условий на новой линии Томмот – Якутск МИИТ предложил и генподрядчик принял (корпорация «Инжтрансстрой») технологический регламент *интенсивной технологии упрочнения слабых оснований* [9,11].

IV.

Рассмотрим содержание **третьей стадии** композитной технологии – интенсивного упрочнения основания (рис. 4). Ее регламент включал:





Примечание:

I_n – ширина прорезей; $I_ш$ – шаг между прорезями; $I_ф$ – путь фильтрации воды.

Рис. 4. Технологическая схема устройства поперечных прорезей в слабом основании (1 – выравнивающий слой; 2 – дренажные каналы; 3 – дренажные прорези; 4 – геотекстиль; 5 – защитный слой; 6 – виброкаток; 7 – слой насыпи).

- устройство продольных дренажных канав вдоль откосов насыпи с засыпкой песчано-гравийной смесью (ПГС);

- устройство дренажных прорезей с уклоном, экскаватором с погрузкой грунта на автосамосвалы и вывозом в отвал, заполнение прорезей ПГС фронтальным погрузчиком, работающим в комплексе с экскаватором (прорези устраиваются в слабых водонасыщенных грунтах с целью ускорения консолидации основания за счет сокращения пути фильтрации воды, отжимаемой из слабой толщи);

- устройство защитного слоя и уплотнение основания виброкатками по защитному слою; этот основной технологический этап предназначен для контролируемого уменьшения влажности и повышения модуля деформации грунтов;

- отсыпка слоев насыпи расчетной мощностью 0,4–0,8 м до проектной отметки с уплотнением виброкатками.

Уплотнение грунтов на строительстве земляных сооружений отличается сложным взаимодействием характеристик грунтовых массивов насыпей, оснований и параметров работы катков при контроле и регулировании технологических процессов. В совокупности они образуют технико-

технологическую систему, функционирующую на принципах прямой и обратной связи между параметрами отдельных подсистем, чтобы наиболее эффективно и качественно шли работы.

Особенно важен систематический контроль за изменением всех грунтовых характеристик на участках высокотемпературной мерзлоты.

Управление технологическими процессами после отсыпки и уплотнения каждого последующего слоя включает:

- лабораторные испытания грунтов (модуля деформации, порового давления, осадки, температуры);
- прогноз грунтовых характеристик основания и насыпи;
- расчёт коэффициентов стабильности;
- регулирование параметров вибрационной нагрузки.

Интенсивная технология была запроектирована для экспериментального участка с высокотемпературной мерзлотой в слое текучепластичного суглинка толщиной 2,5 м, подстилаемого песчаником и доломитом, на 673 км линии Томмот – Кердем. Проведенная совместно с кафедрой «Путь и путевое хозяйство» МИИТ комплексная оценка устойчивости слабого основания

и напряженно-деформируемого состояния грунтов показала, что при традиционной отсыпке насыпи с бермами возникают зоны нестабильности.

Был предусмотрен адаптированный календарный план производства работ: 1) устройство дренажных канав, прорезей и защитного слоя – осенью, после промерзания верхней части деятельного слоя; 2) весенний дренаж и отвод воды по прорезям в канавы и далее в водопропускную трубу; 3) летнее оттаивание и дренаж деятельного слоя; 4) интенсивное уплотнение основания виброкатком с отжатием поровой воды в дренажные прорези. В таком исполнении интенсивная технология улучшает характеристики грунтов и не приводит к нарушению устойчивости при отсыпке насыпи. Одновременно ликвидируются зоны нестабильности.

ВЫВОДЫ

Композитная технология объединяет (во времени и по совместному влиянию на температурный режим основания) положительные качества отдельных стадий: устройства технологической автодороги; регулирования теплозащитных свойств грунтов основания и конструкции ТАД; устройства термосифонов у основания технологической автодороги для промерзания грунтов талика; регулирование влажности грунтов; интенсивное уплотнение основания; отсыпка над таликом нижней части насыпи и бERM с доставкой грунта по технологической автодороге.

Последовательность мероприятий для регулирования теплового режима грунтовых массивов проявляется исключительно комплексно. Отметим и эффективность разработанного в МИИТ и запатентован-

ного метода технологического регулирования, обеспечивающего управляемое воздействие на параметры строительного производства с целью профилактики и лечения опасных для земляных сооружений предельных состояний оснований.

Изложенные стадии профилактических и лечебных мероприятий взаимосвязаны и составляют композитную технологию, результативность которой состоит в повышении надежности земляных сооружений в строительный период в наиболее уязвимых местах потенциальной деградации вечной мерзлоты.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Цернант А. А. Применение геотекстиля при управлении качеством грунтовых массивов//Применение геотекстильных материалов в строительстве. – М., 1988.
- 2 Роман Л. Т., Цернант А. А., Полещук В. Л., Цеева А. Н., Леванов Н. И. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне. – М., 2008.
- 3 Ершов Э. Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002.
- 4 Пассек В. В. Расчет температурного режима оснований и тела транспортных сооружений. – М.: Транспорт, 1982.
- 5 Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002.
- 6 Хрусталёв Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне – М.: Изд-во МГУ, 2005.
- 7 Кондратьев В. Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах: Монография. – Чита: Забтранс, 2001.
- 8 Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях/Под общ. ред. С. Я. Луцкого. – М.: Тимр, 2005.
- 9 Луцкий С. Я., Ашпиз Е. С., Долгов Д. В. Дорожное полотно и способ его возведения/Патент на изобретение № 2273687, 2006.
- 10 ВСН 61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. – М., 1990.
- 11 Луцкий С. Я., Шепитько Т. В. и др. Строительство путей сообщения на Севере. – М.: ЛАТМЭС, 2009.
12. СНИП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». ●

COMPOSITE CONSTRUCTIONS IN TUNDRA

Lutsky, Sviatoslav Ya. – D.Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).
Cherkasov, Alexander M. – Ph.D. (Tech), head of permafrost laboratory of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Hripkov, Constantine N. – engineer of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors study the problem of railway construction in permafrost conditions. They describe composite technology engineered in Moscow State University of Railway Engineering for the zones of Yamal and Yakutia and assess relevant research and development activities.

Key words: ecological engineering, railway, permafrost, cryology, composite technology.

Координаты авторов (contact information): Луцкий С. Я. – luy40@mail.ru, Черкасов А. М. – miit-niml@mail.ru, Хрипков К. Н. – Duveteux@mail.ru.

