

# Опыт строительства и проблемы стабильности земляного полотна Цинхай-Тибетской железной дороги на участках вечной мерзлоты

В. Г. КОНДРАТЬЕВ, докт. геол.-мин. наук, научный руководитель НПП «ТранСИГЭМ», профессор



**Концепция развития железнодорожного транспорта России до 2030 г. предусматривает новое строительство протяженных железнодорожных линий преимущественно в регионах Севера и Востока страны для их инфраструктурного развития и получения новых источников природных ресурсов. В статье дано описание опыта строительства Цинхай-Тибетской железной дороги в Китае в 2000–2006 гг., который должен быть учтен как при реализации амбициозных проектов строительства новых железнодорожных линий на Севере и Востоке России, так и при стабилизации земляного полотна существующих железных дорог в криолитозоне, около 5000 км которых нуждаются в капитальном ремонте.**



**Ц**инхай-Тибетская (Цинхай-Хизанская) железная дорога соединяет г. Синин — центр Цинхайской провинции и г. Лхаса — столицу Тибетского автономного района и имеет общую протяженность 1956 км. Первая часть дороги, от Синина до Голмуда (814 км), сооружалась 10 лет, с 1974 по 1984 гг.

Вторая часть, от Голмуда до Лхасы (1142 км), построена в 2 раза быстрее и на 1 год раньше проектного срока, строительство было начато 29 июня 2001 г., а уже с 1 марта 2006 г. начались регулярные грузовые и с 1 июля 2006 г. — пассажирские перевозки. Эта дорога характеризуется сложнейшими горно-геологическими условиями: 80% трас-

сы от Голмуда до Лхасы проходит по территории с абсолютными отметками местности свыше 4000 м и около 50% — по вечномерзлым грунтам со среднегодовой температурой от  $-0,5$  до  $-3,6^{\circ}\text{C}$  и мощностью от 5–25 до 60–130 м и больше. Наивысшую отметку трассы — 5072 м на перевале через хребет Тангулашань — пассажирский поезд преодолевает со скоростью 100 км/час, а весь путь от Голмуда до Лхасы занимает всего 13 часов. Такое же расстояние, например, от Читы до Иркутска по Транссибу скорый поезд идет на 5 часов дольше.

Сооружение Цинхай-Тибетской железной дороги — это новейший этап железнодорожного строительства в условиях вечной мерзлоты и глубокого сезонного промерзания грунтов и новая, колоссальная по масштабам и средствам, попытка найти технические решения, позволяющие обеспечить стабильность железнодорожного пути на льдистых, просадочных при оттаивании многолетнемерзлых грунтах.

Важно отметить, что при строительстве Цинхай-Тибетской ж.д. с самого начала строительства реализуется обширная программа опытно-экспериментальных работ, которая продолжается и при эксплуатации дороги. В этих работах задействованы ведущие специалисты и институты, благодаря чему получен и продолжает накапливаться уникальный опыт по проблеме стабилизации земляного полотна железных дорог на вечномерзлых грунтах.

На трассе Цинхай-Тибетской ж.д. от Голмуда до Лхассы вечная мерзлота по информации разных авторов [9,11,15] имеет преимущественное распространение на протяжении 560–546 км и островное на 210–82 км, что обусловлено высокогорным расположением дороги — 950 км трассы проходит на высоте более 4000 м над уровнем моря.



**Рис. 1.** Сооружение моделей солнцезащитного навеса на экспериментальном полигоне СЗФ, июль 2000 г. Фото Чжан Лусина

Верхний слой мерзлоты нередко сложен сильнольдыстым горизонтом (с льдистостью до 80%) мощностью до 5 м и более. Сооружение земляного полотна, в особенности выемкой, на таких грунтах представляется весьма затруднительным. В связи с этим еще до начала строительства на специальном полигоне на трассе железной дороги на подошве южного склона горы Фэнхо нагорья Цинцзян (34° 43' северной широты и 9° 52' восточной долготы) длительное время проводились натурные исследования, в том числе испытывались различные конструкции земляного полотна, как насыпи, так и выемки.

По данным Северо-Западного филиала Академии наук Министерства железных дорог Китая (СЗФ), климатические условия полигона (средние за многолетний период наблюдений) следующие: среднегодовая температура воздуха — -6,2°; минимальная и максимальная среднемесячные температуры воздуха — -17,7° (январь) и +4,6° (июль); годовая сумма осадков — 345 мм; годовая сумма испарения — 137° мм; основные направления ветра: главное — юго-западное; второстепенное — юго-восточное; средняя скорость ветра — 5 м/сек, максимальная — 12–15 м/сек; максимальная толщина снега — 8 см.

Мерзлотно-грунтовые условия экспериментальной площадки: мощность многолетнемерзлой толщи — 120 м (по расчету); среднегодовая температура грунтов — -3,5°; глубина годовых коле-

баний температуры — 13 м; глубина сезонного оттаивания грунтов — 1,4–1,5 м; грунтово-влажностный разрез: 0–0,3 м — почва с влажностью (W) 15,3% и объемным весом сухого грунта (Y) 1,73 г/см<sup>3</sup>, 0,3–1,5 м — суглинок с включением щебня с W=19,3% и Y=1,71 г/см<sup>3</sup>, 1,5–2,1 м — ледогрунт с W=78,2% и Y=1,25 г/см<sup>3</sup>, 2,1–3,4 м — суглинок с включением щебня с W=38,6% и Y=1,60 г/см<sup>3</sup>, ниже 3,4 м — выветрелый песчаный слой с W=15,3% и Y=2,20 г/см<sup>3</sup>.

Сезонное оттаивание грунтов происходит с конца апреля по середину сентября на глубину до 1,55 м. Промерзание сезонно-талого слоя происходит практически в течение одного месяца — октября.

В 2000 г. на полигоне была начата опытно-экспериментальная проверка конструкции железнодорожной выемки с солнцезащитным навесом [5]. Опытная конструкция земляного полотна представлена выемкой, перекрытой солнцезащитным навесом (рис. 1) для предотвращения деградации вечномерзлых грунтов в основании пути и обеспечения его стабильности. Площадка имеет общий уклон около 12,4°.

В экспериментальной выемке были проведены наблюдения за температурой грунтов в 7 специальных скважинах глубиной до 6 м, размещенных по бокам выемки, в середине откосов, у их подножья, водоотводной канаве, в середине выемки.

Вначале, до натурального эксперимента, Чжан Лусин и Лю Цзянкун [14] выполнили математическое моделирование температурного режима накрытой навесом железнодорожной выемки в многолетнемерзлых грунтах Тибета и получили весьма обнадеживающие результаты: через 20 лет под выемкой с навесом температура грунтов на глубине 6–9 м должна достигать -8°С, тогда как без навеса формируется талик мощностью около 9 м. Затем в лабораторных условиях профессор Лю Цзянькун с соавторами [10] провели физическое моделирование сохранения многолетнемерзлых грунтов основания дорожной выемки с помощью солнцезащитного навеса для условий Тибета, на основе чего был сделан вывод о высокой эффективности навеса даже в условиях возможного потепления климата (повышения среднегодовой температуры воздуха на 0,5°).

Конструкция навеса для экспериментальной выемки на Тибете была разработана автором статьи и доцентом, канд. техн. наук В. Г. Шестаковым в

1999 г. по просьбе президента СЗФ профессора Хуан Сяомина.

Рассматривалось три варианта конструкции навеса: 1) арка навеса перекрывает лишь основную площадку земляного полотна, а часть прилегающей поверхности выемки закрывается окрылками; 2) сплошная арка навеса перекрывает всю выемку; 3) арка навеса перекрывает всю выемку и состоит из двух частей, соединенных шарнирно-неподвижно и опирающихся на стойку-свая. Для эксперимента был рекомендован последний вариант конструкции навеса, как обладающий наибольшим охлаждающим эффектом и наименьшим весом, а значит — и наименьшей стоимостью.

В июне 2000 г. СЗФ приступил к экспериментальной проверке влияния солнцезащитного навеса на температурный режим грунтов натурной модели железнодорожной выемки на полигоне на Тибете. На начальном этапе было построено три модели солнцезащитного навеса для различного изучения влияния навеса на температурный режим грунтов основной площадки, юго-восточного (рис. 1) и северо-западного откосов выемки на склоне горы Фэнхо. Навес, который бы перекрыл всю выемку, построен не был.

В течение нескольких лет на полигоне измерялись температура грунтов и теплотокки под моделями навесов и вне их. Были получены хорошие результаты: за неполный летний сезон под навесом грунты имели температуру на 7–9°С ниже, чем вне его. По устному сообщению профессора Чжан Лусина в октябре 2001 г., а затем и в сентябре 2004 г., наблюдения на полигоне с натурными моделями навесов показали, что среднегодовая температура грунтов под навесом понизилась на несколько градусов.

В 2005 г. по проекту Первого проектно-изыскательского института (ППИИ) солнцезащитные навесы из панелей-сэндвичей были сооружены на откосах насыпи (рис. 2) и над основной



**Рис. 2.** Солнцезащитные навесы на откосах земляного полотна Цинхай-Тибетской ж. д. на участке льдыстых грунтов в основании, 12 августа 2006 г.





**Рис. 3. Поперечные вентилируемые трубы в основании земляного полотна Цинхай-Тибетской ж. д. на участках льдистых грунтов: а — пластиковые, б — железобетонные, автоматически закрывающиеся крышками (фото профессора Нью Фуджина)**

площадкой непосредственно на Цинхай-Тибетской ж. д. По данным натурных наблюдений [12] они понижают температуру грунтов на 3–5°С и, соответственно, способны обеспечивать стабильность земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах.

Успешное применение этих навесов на Цинхай-Тибетской ж. д. для предотвращения деградации вечной мерзлоты в основании железнодорожного пути, по нашему убеждению, открывает широкие перспективы для их использования в России, в частности, на достраиваемой Амуро-Якутской железнодорожной магистрали, особенно на подходе к реке Лена, где на десятках километров трассы имеются грунты так называемого ледового комплекса мощностью до десятков метров. Такую толщину невозможно ни вырезать, ни предварительно оттаять, поэтому ее придется предохранять от оттаивания на протяжении всего периода эксплуатации дороги. В 2007 г. было выполнено теплотехническое обоснование применения навесов для предотвращения деградации сильнольдистых многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна строящейся железной дороги Томмот — Кердем на примере пяти участков (трех насыпей высотой по оси пути 3,48; 6,64 и 7,31 м и двух выемок глубиной 2,38 и 5,5 м). Для этих же участков были выполнены теплотехнические расчеты охлаждающего влияния каменной наброски на откосах насыпей и выемок, предусмотренной проектом линии. Сравнение результатов расчетов показало более высокую эффективность солнцезащитных навесов для охлаждения грунтов тела и основания земляного полотна и предотвращения деградации подстилающих многолетнемерзлых грунтов, в особенности в сочетании с доломитовой обсыпкой (покраской) поверхности основной площадки и противодиффузионной пленкой под ней по сравнению с каменной наброской [3]:

- Навесы на откосах насыпей и выемок позволяют уменьшить на 10–31%, в

среднем на 22,4%, глубину залегания кровли многолетнемерзлых грунтов по оси пути;

- Навесы на откосах насыпей и выемок, а также доломитовая обсыпка (покраска) поверхности основной площадки позволяют уменьшить на 25–35% (в среднем — на 30,6%) глубину залегания кровли многолетнемерзлых грунтов по оси пути;

- Навесы на откосах насыпей и выемок, а также доломитовая обсыпка (покраска) поверхности основной площадки и противодиффузионная пленка под ней позволяют уменьшить на 28–40% (в среднем — на 34,6%) глубину залегания кровли многолетнемерзлых грунтов по оси пути.

Уже через 5 лет грунты основания и значительной части тела насыпи под навесом оказываются в многолетнемерзлом состоянии, тогда как под каменной наброской и через 5 лет все еще сохраняется талик, а его полное промерзание происходит лишь через 50 лет.

Теплотехнические расчеты для Амуро-Якутской магистрали, как и экспериментальные исследования на Тибете [8, 10–12, 14], позволяют утверждать, что солнцезащитный навес может стать основным противодеформационным устройством для земляного полотна железных дорог на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов.

На Цинхай-Тибетской железной дороге успешно реализовано и другое наше техническое решение — насыпь с поперечными охлаждающими трубами [7]. При этом были применены как железобетонные (рис. 3а), так и пластиковые трубы (рис. 3б), варьировались высота над подошвой насыпи и шаг укладки труб. Для эффективной работы поперечных охлаждающих труб необходимо закрывать их отверстия на теплый период года и открывать с наступлением зимы. Для этого были применены автоматические заслонки (рис. 3б).

Проверяя все известные в мировой практике технические решения по

проблеме стабилизации земляного полотна железных дорог на вечномерзлых грунтах, проектировщики Цинхай-Тибетской железной дороги нередко повторяют и известные ошибки, например, в решениях с теплоизоляцией или с сезонно-действующими охлаждающими устройствами (термосифонами) — их было установлено 5 млн штук, что, однако, вряд ли предотвратит деформации земляного полотна (рис. 4а), поскольку радиус действия термосифона любой конструкции не превышает 1,5–2 м.

При строительстве китайцами применен и ряд собственных, на наш взгляд, чересчур смелых технических решений. Например, во многих местах использован так называемый «сухой мост» — эстакадный переход (рис. 4б) участков льдистых вечномерзлых грунтов протяженностью в сотни метров, а часто и в несколько километров. Самый длинный «сухой мост» имеет длину 11,7 км и опирается на 2878 опор.

Стоимость такого «сухого моста» раз в 30 превышает стоимость земляного полотна обычной конструкции с противодеформационными мероприятиями. Однако, на наш взгляд, и эта конструкция, сколь бы радикальным



**Рис. 4. Экспериментальные конструкции Цинхай-Тибетской ж. д. на участках вечномерзлых грунтов: а — с термосифонами, август 2006 г.; б — «сухой мост», сентябрь 2004 г.**

решением она ни казалась, нуждается в специальной защите от просадок при оттаивании льдистого основания, неравномерного выпучивания опор эстакады, деструкции их оголовков в сезонно-талом слое при постоянно чередующихся процессах замерзания и оттаивания вмещающих грунтов, к тому же имеющих разную интенсивность на северной и южной сторонах эстакады.

По заявлениям китайских специалистов, сейчас Цинхай-Тибетская ж. д., находящаяся в эксплуатации 3 года, не имеет тревожных участков, которые могли бы влиять на движение поездов. Тем не менее, по данным их же полевых наблюдений 2006–08 гг. [9], уже сейчас развиваются болезни земляного полотна: термокарст, осадки и сплывы при оттаивании, термоэрозия, морозное пучение и др.

Так, в 2007 г. в полосе 100 м по обе стороны от земляного полотна насчитывалось до 250 термокарстовых озер площадью от 600 до 1200 м<sup>2</sup>, из которых около 70% имели эллиптическую, а 12% — вытянутую формы; 80% термокарстовых озер зимой не промерзают до дна.

Многочисленные осадки земляного полотна при оттаивании многолетнемерзлых грунтов в основании отмечены главным образом на участках широких насыпей и сочленений с мостами. Анализ наблюдений с июля 2003 г. по декабрь 2007 г. тепловых осадков насыпей высотой от 3,2 до 6,0 м на 56 участках показал, что они тем больше, чем выше насыпь. Кроме того, в 2007 г. отмечены просадки берм общей протяженностью около 1 км, в 2005 г. такие просадки не отмечались. По данным обследования в апреле 2009 г. на участке от Ердугтоу до Белухэ 43 мостов в 172 точках (по 4 точки на 1 мост) установлено, что осадки имеют место в 73% точек, а в 44 точках (35,2%) осадки составили более 10 см. Судя по тенденции, количество их может увеличиваться.

Это еще раз подтверждает, что для обеспечения надежности дорог в районах вечной мерзлоты и глубокого сезонного промерзания грунтов недостаточно только построить их, даже вложив огромные, как на Тибете, средства, необходимо еще обеспечить систематическую защиту дорог от неблагоприятного воздействия инженерно-геокриологических процессов, что наиболее эффективно в рамках системы инженерно-геокриологического мониторинга линии [7].

К положительному опыту Цинхай-Тибетской ж. д. следует отнести обшир-

ный объем опытно-экспериментальных работ для обоснования и проверки, в частности, технических решений железнодорожного пути на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов, причем не только в период изысканий и проектирования, но и при строительстве и, что особенно важно, при эксплуатации дороги. Мониторинговые исследования показали высокую эффективность разработанных в России, но впервые примененных в Китае солнцезащитных навесов, поперечных вентилируемых труб. Каменная наброска, впервые примененная на БАМЕ, по-прежнему может считаться эффективным решением, однако лишь при определенных условиях.

А вот надежды на термосифоны, теплоизоляцию, а местами и каменную наброску, не оправдались, что еще раз подтверждает необходимость разработки принципиально других технических решений и технологических приемов, основанных на регулировании естественных и техногенных отопляющих и охлаждающих факторов в конкретных природно-климатических и мерзлотно-грунтовых условиях.

Этот опыт, несомненно, должен быть учтен в России, где возобновляется строительство новых железных дорог в районах с вечной мерзлотой и глубоким сезонным промерзанием грунтов, в частности, при проектировании и строительстве новой железнодорожной линии Нарын — Лугокан для освоения полезных ископаемых на юго-востоке Забайкальского края, а также при завершении строительства Амуро-Якутской железнодорожной магистрали и, в особенности, при стабилизации земляного полотна на участках льдистых грунтов Забайкальской, Дальневосточной и Восточно-Сибирской железных дорог в составе обновления инфраструктуры по Инвестиционной программе ОАО «РЖД» на 2010 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев В. Г. Новые способы укрепления основания железнодорожного земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах // Железнодорожный транспорт. Серия «Строительство. Проектирование»: ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. — 1995. — Вып. 1. — С. 13–26.
2. Кондратьев В. Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах. — Чита: Забтранс, 2001.
3. Кондратьев В. Г. Вековая, но не вечная же проблема железных дорог на вечной мерзлоте // Транспорт Российской Федерации. — 2008 — № 3–4 (16–17). — С. 58–61.

4. Кондратьев В. Г. Стабилизация земляного полотна и опор контактной сети и воздушных линий на вечномерзлых грунтах. — Чита: ЧитГУ, 2005.
5. Кондратьев В. Г., Королев А. А., Карлинский М. И., Позин В. А., Розанов А. С. Железнодорожный путь на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Патент на изобретение № 1740555, 1992.
6. Кондратьев В. Г. Карлинский М. И., Савельев Б. А., Соколов А. В. Насыпь на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Патент на изобретение № 2010919, 1993.
7. Кондратьев В. Г., Позин В. А. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга строящегося железнодорожного пути Беркамит — Томмот — Якутск. — Чита: Забтранс, 2000.
8. Feng Wenjie, Wen Zhi, Sun Zhizhong, Wu Junjie. Application and Effect Analysis of Awning Measure on Cold Regions. Proceeding of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15–17 October, 2009, Xi'an, China. — P. 148–160.
9. Lin Zhanju, Niu Fujin & Xu Zhiying et al. Roadbed Diseases and Their Development States along the Qinghai-Tibet Railway. Proceeding of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15–17 October, 2009, Xi'an, China. — P. 489–501.
10. Liu Jiankun, Li Dongqing, Ma Wei, Zhang Luxin. Modeling of the Sun-Precipitation Shed in Protecting Roadbed-cut on Permafrost in Tibet, China. Permafrost Engineering. Proceedings of the Fifth International Symposium on Permafrost Engineering. — Yakutsk: Permafrost Institute Press. 2002 — Vol. 2. — P. 80–88.
11. Jia Jianhua, Ran Li, Wang Jiyin. Choice and construction technology of foundation types for railway buildings in permafrost regions, Ginxai-Xizang plateau. Proc. International Symposium on Geocryological Problems of Construction in Eastern Russia and Northern China. — Yakutsk: SB RAS Publishers, 1998. — Vol. 1. — P. 180–183.
12. Niu Fujin, Shen Yongping. Guide of Field Excursion after Asian Conference on Permafrost (Aug. 10–16, 2006). Lanzhou, China, 2006.
13. Wu Ziwang and et al. Roadbed engineering in permafrost regions. Lanzhou University, 1988. — P. 43–60.
14. Zhang Luxin, Liu Jiankun. Numerical investigation of experimental roadbed thermal stability on Fenghuoshan permafrost in Tibet. Proc. International Symposium on Geocryological Problems of Construction in Eastern Russia and Northern China. — Yakutsk: SB RAS Publishers, 1998. — Vol. 2. — P. 3–7.
15. Zhang Jian-ming, Zhang Ming-yi, Zhu Yuanling et al. Experimental Study on Settlement of Embankment over Permafrost along Qinghai-Tibetan Railway // Journal of Glaciology and Geocryology. — Vol. 26. — Suppl. Aug. 2004. — Published by Science Press. China. Beijing. — P. 155–160.