

**Анализ принципов проектирования земляного полотна
автомобильных дорог в районах распространения вечномёрзлых
грунтов в Западной Сибири**

А. Н. Шуваев^{1*}, М. В. Панова¹, С. В. Картавый²

¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

²ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Тюмень

*e-mail: anshuvaev46@mail.ru

Аннотация. Разработанные в прошлом столетии и применяемые в настоящий период проектными организациями принципы проектирования автомобильных дорог на вечномёрзлых грунтах не обеспечивают требуемую устойчивость земляного полотна, что приводит к преждевременному разрушению дорожных одежд. Одной из основных причин является недоучет процессов тепловлагопереноса системы «атмосфера — насыпь — деятельный слой основания». При отсыпке земляного полотна из сыпуче- и сухомёрзлых грунтов расчетная высота насыпи по первому принципу составляет 2,0–2,5 м. Но уже в первый летний период за счет фильтрации воды атмосферных осадков происходит оттаивание не только грунтов насыпи, но и деятельного слоя основания. Это приводит к дополнительному переувлажнению деятельного слоя и возникновению деформаций осадки земляного полотна и дорожной одежды. В зимний период накопленный таким образом потенциал воды мигрирует к зоне промерзания, и за счет сил морозного пучения проявляются деформации расширения и растрескивания грунтов насыпи. Для надежного регулирования водно-теплового режима насыпи требуется разработка конструкций с применением геотехнических материалов.

Ключевые слова: дорожные одежды; земляное полотно; мерзлые грунты; замерзание; оттаивание; верхний горизонт вечномёрзлых грунтов

**Analysis of the subgrade design concept in areas of permafrost
soil distribution in Western Siberia**

Anatoly N. Shuvaev^{1*}, Marina V. Panova¹, Sergey V. Kartavy²

¹University of Tyumen, Tyumen, Russia

²Gazpromneft NTC LLC, Tyumen, Russia

*e-mail: anshuvaev46@mail.ru

Abstract. The subgrade design concept on permafrost soils was developed in the last century, and currently it are still used in the highway engineering by design organizations. However, this design concept doesn't provide the required stability of the subgrade that leads to premature destruction of road pavement. One of the main reasons for the destruction of road pavement is the lack of accounting for the processes of heat and moisture transfer of the "atmosphere — embankment — active base layer" system. When filling the subgrade with loosely frozen soils and dry frozen soils, the estimated embankment height according to the first principle is 2,0–2,5 m. Nevertheless, in summer the embankment soils, but also the active base layer is thawed by filtering water. This leads to additional waterlogging of the active layer and the occurrence of deformations of the settlement of the subgrade

and road pavement. In winter the water potential thus accumulated migrates to the freezing zone, and due to the forces of frost heaving, expansion and cracking deformations of the embankment soils appear. Therefore, the development of structures using geotechnical materials is necessary for reliable regulation of the water-thermal regime of the embankment.

Key words: road pavement; subgrade; frozen soils; freezing; thawing; the upper horizon of permafrost soils

Введение

В задачу проектирования грунтовых насыпей транспортных сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов входит не только обоснование конструкции земляного полотна¹, но и прогнозирование процессов их формирования [1–4].

Грунт, как многофазная система, состоит из минеральных частиц, воды (в твердой и жидкой фазе) и газов. Лед присутствует в качестве породообразующего минерала, что является его отличительной особенностью. В мерзлых грунтах все составляющие изменяются при изменении внешних воздействий температуры, давления и т. д., находясь в динамическом равновесии^{2,3,4}.

Поровый лед занимает равномерно распределенные полости, которые частично смыкаются при оттаивании, а при последующем промерзании вновь заполняются. При оттаивании льда фильтрация воды происходит по одним и тем же порам и микротрещинам.

Наличие этих обстоятельств — постоянные разработанные пути фильтрации и обезвоженность мерзлых грунтов — обусловили высокий коэффициент фильтрации при их оттаивании.

Влияние геометрических размеров насыпи на водно-тепловой режим

Натурные наблюдения показывают, что при прочих равных условиях площадь подошвы насыпи значительно влияет на состояние грунтов деятельного слоя основания. Вторым фактором являются величина установившейся среднегодовой температуры грунтов на ее поверхности и температура мерзлых пород на глубине нулевых амплитуд в пределах полосы отвода.

Определенные геометрические параметры и конструктивные элементы насыпи будут способствовать охлаждению подстилающих грунтов и, следовательно, повышению ее устойчивости. В этом случае установившаяся среднегодовая температура поверхности грунта под насыпью окажется ниже, чем температура мерзлых пород в естественных условиях. В противном случае эти условия будут оказывать тепляющее влияние на грунты основания.

¹ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02-85) / Гос. всеююз. дор. НИИ. — М.: Стройиздат, 1989. — 192 с.

² Инструкция по проектированию и строительству автомобильных дорог для обустройства нефтяных и газовых месторождений на севере Тюменской области и в других районах тундры с аналогичными условиями: ВСН 201-85 / Минтрансстрой. — Введ. 1985-07-01. — М.: Союздорнии, 1985.

³ Инструкция по проектированию и строительству промысловых автодорог на нефтяных и газовых месторождениях Западной Сибири. ВСН 26-90. — Тюмень, 1991.

⁴ Методические рекомендации по использованию торфа в нижней части насыпи при строительстве автомобильных дорог на болотах [Электронный ресурс] / А. Н. Шуваев [и др.]. — М.: СоюзДорНИИ, 1973. — Режим доступа: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/44/44291/index.htm>.

Формирование нового деятельного слоя в основании таких насыпей независимо от времени производства работ по их отсыпке завершается в течение 3–5 лет. Объясняется это явление применением дренирующих и слабо дренирующих грунтов и температурой атмосферных вод, проникающих к поверхности основания путем инфильтрации. Особенно велико влияние инфильтрации на температурный режим в основании и теле насыпей, отсыпанных в зимнее время из сыпучемерзлых грунтов. Отсутствие в таком грунте порового льда-цемента обуславливает его высокую водопроницаемость, благодаря чему такие насыпи при высоте их до 5,0 м после выпадения первых летних дождей, как правило, полностью оттаивают. И лишь спустя 2–3 года после отсыпки земляного полотна, когда предзимняя влажность грунтов в теле насыпи достигает 10 % и более, происходит частичная кольматация пор сыпного грунта льдом, что снижает влияние инфильтрации осадков на термическую деятельную зону.

Обусловлено это тем, что большая часть атмосферной влаги, проникающей в тело земляного полотна, скатывается по мерзлому водоупору в стороны, не израсходовав аккумулированных в ней значительных запасов тепла. В теле насыпей преобладает кондуктивная передача тепла, что в конечном счете приводит к закономерному уменьшению мощности слоя сезонного оттаивания грунтов основания в сечении по оси насыпей с ростом их высоты.

Даже незначительное просачивание воды в основание насыпи вызывает необратимое повышение температуры подстилающих грунтов (в зоне фильтрации температура грунта становится положительной), что обычно приводит к развитию значительных по величине и длительных осадок земляного полотна.

Оттаивание грунта связано с появлением деформации консолидации, которая протекает медленно и сложнее, чем консолидация талого грунта.

Анализ принципов проектирования грунтовых насыпей на мерзлоте

В восьмидесятых годах прошлого столетия были разработаны три принципа проектирования земляного полотна автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. Первый принцип предусматривает обеспечение условий расположения верхнего горизонта вечномерзлых грунтов (ВГВМГ) выше подошвы насыпи и сохранения его на этом уровне в течение всего периода эксплуатации дороги. Строительство в России по этому принципу трудоемко и неэкономично, что связано с отсутствием сыпуче- и сухомерзлых грунтов для возведения земляного полотна.

Второй принцип предусматривает расположение ВГВМГ ниже подошвы насыпи, но при этом допустимая глубина оттаивания грунтов ограничивается нормативными значениями вертикальных необратимых деформаций дорожной конструкции. Осадки становятся существенно большими, чем при строительстве по первому принципу, вследствие чего предъявляются повышенные требования к дорожной одежде.

Третий принцип проектирования, предусматривающий предварительное оттаивание и осушение грунтов в карьерах и в пределах полосы отвода, целесообразно использовать на территориях, имеющих дренирующие грунты.

Проектирование по первому принципу [5–8] осуществляется, как правило, на особо сложных по мерзлотно-грунтовым условиям участках с низкотемпературной вечной мерзлотой на глинистых просадочных грунтах с высокой (выше предела текучести) влажностью, когда оттаивание грунта основания не допускается, так как это может привести к недопустимым деформациям и разрушению дорожной одежды, особенно на участках дорог с капитальным типом

покрытия. При этом земляное полотно проектируют в насыпях, выемки за-прещаются. Минимальную высоту насыпи на мерзлых грунтах определяют на основе теплотехнического расчета промерзания (протаивания) грунтов естественного основания и насыпей дорог с учетом капитальности дорожной одежды и принятого типа покрытия, а также допустимых норм осадок основания насыпи в период эксплуатации дороги.

Высота насыпей определяется расчетами на теплоустойчивость, снегонезаносимость и прочность на основании положений ВСН 84-89, СП 34.13330-2012, СП 25.13330.2012, используются компьютерные программы численного решения тепловых задач или методика теплотехнического расчета. Окончательно принимается высота, обеспечивающая выполнение всех требований, предусмотренных указанными документами.

Проектирование и строительство дорог по второму принципу производится на сложных по мерзлотно-грунтовым условиям участках местности с низкотемпературной вечной мерзлотой на глинистых и песчаных малопросадочных грунтах с влажностью менее предела текучести, когда допускают оттаивание грунтов основания на расчетную величину с учетом допустимых деформаций покрытия в процессе эксплуатации дороги. Высота насыпи назначается из условия снегонезаносимости, а осадка при оттаивании и морозное пучение при промерзании не превышают допустимой величины, согласно теплотехническим расчетам. Земляное полотно проектируется в насыпях, выемки допускаются в исключительных случаях.

Проектирование дорог по третьему принципу осуществляется на легкоосушаемых грунтах с влажностью менее предела текучести на участках высокотемпературной вечной мерзлоты. Его применяют обычно на сухих и сырых участках местности, когда предусматривается заблаговременное (за 1–2 года до начала строительства) оттаивание мерзлых грунтов, устройство водоотвода и осушение дорожной полосы, что приводит к упрочнению грунтов основания за счет их предпостроечной осадки при оттаивании.

В условиях многолетнемерзлых грунтов основной объем земляных работ предпочтительнее выполнять в зимнее время, используя естественное промерзание грунта для технологических проездов, передвижения строительных машин и механизмов, а также глубокое промораживание слабых оснований и тела насыпи в целях сохранения заданного теплового режима на участках дороги, запроектированных по первому принципу.

Существуют два варианта организации строительства дороги [9–12]: одностадийное и двухстадийное. Двухстадийное строительство применяется на дорогах с капитальным типом покрытия. Это практикуется в основном со сборными покрытиями, когда на участке дороги предусматривается открытие временного движения автомобилей до момента проектной стабилизации земляного полотна и окончательного сооружения дорожной одежды. При этом на первой стадии сооружается земляное полотно до проектной отметки с учетом запаса на осадку, выравнивается верх насыпи, и укладываются железобетонные плиты сборного дорожного покрытия без сварки и омоноличивания швов. После достижения проектной глубины оттаивания и стабилизации земляного полотна снимают плиты дорожного покрытия, производят частичную досыпку (если это необходимо) насыпи с глубоким виброуплотнением грунта и окончательное сооружение дорожной одежды.

В течение долгих лет в транспортном строительстве отдавали предпочтение первому принципу проектирования [13, 14]. Первый принцип необходим и в тех районах строительства, где получили развитие мерзлотные процессы и яв-

ления: бугры пучения, жилы и погребенные льды, термокарст и т. д. Такие основания могут обладать несущей способностью только в мерзлом состоянии. Однако повсеместное применение первого принципа имеет свои недостатки. Повышение высоты насыпи, необходимое для реализации первого принципа, связано с удорожанием строительства и уменьшением его темпов. Кроме того, реализация первого принципа существенно влияет на водно-тепловой и гидрологический режимы в полосе отвода.

Схемы замораживания — оттаивания насыпи и деятельного слоя

Поднятие мерзлоты до подошвы насыпи и выше нее нарушает режим надмерзлотных вод, что приводит к образованию наледей. Поэтому в дорожном строительстве в последнее время все чаще стали переходить ко второму принципу проектирования, связанному с допущением частичного оттаивания основания насыпей. На рисунке 1 представлена схема частичного оттаивания грунта деятельного слоя за счет тепловлагопереноса. Расчетный период полного оттаивания плавающий, зависящий от температуры воздуха и состояния грунтов. При этом происходит переувлажнение грунтов деятельного слоя до полной влагоемкости. Как правило, это трудно прогнозируется, и на данный момент отсутствует достоверная методика расчета влагонакопления.

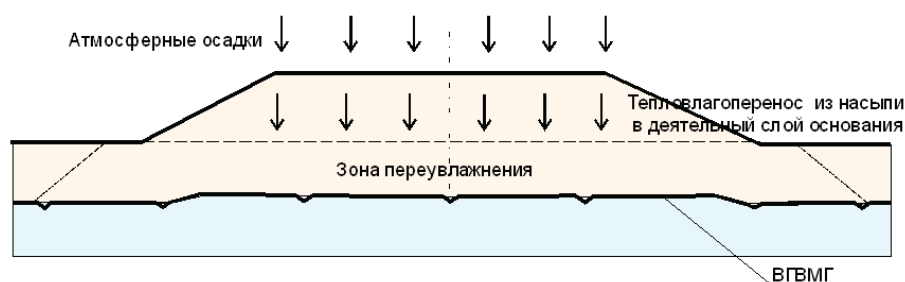


Рис. 1. Схема оттаивания в конце летнего периода

На рисунке 2 показано начало замораживания верхней части насыпи и миграции влаги к фронту промерзания. В средней части насыпи талый массив грунта продолжает отдавать тепло в деятельный слой. Происходит одновременное замораживание верхнего слоя насыпи и оттаивание основания.

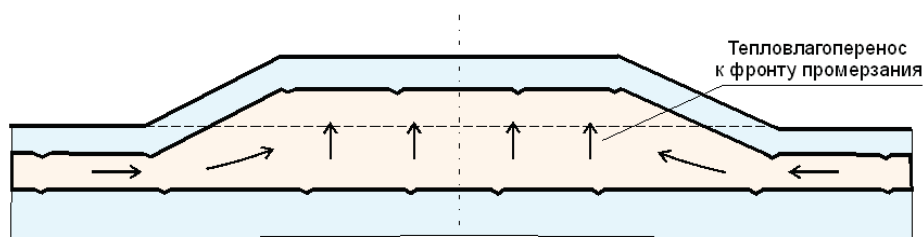


Рис. 2. Схема замораживания в начальный зимний период

По данным мониторинга [15] опытных участков промысловых дорог, в Новом Уренгое такое явление происходит до начала зимнего периода. На третьей стадии, после полного промораживания деятельного слоя к середине зимы, возможно наличие талого переувлажненного грунта в средней нижней части насыпи и основания (рис. 3).

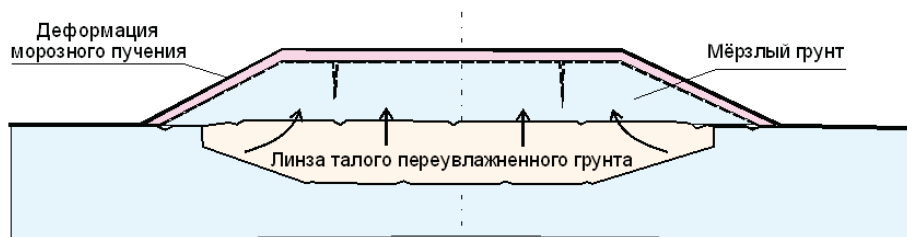


Рис. 3. Схема замораживания грунтов насыпи и деятельного слоя в зимний период

Продолжается миграция влаги к фронту промерзания, а проходя через мерзлый грунт земляного полотна, часть воды испаряется с образованием морозобойных трещин и увеличением деформаций за счет сил морозного пучения (рис. 4). В весенний период деформации насыпи при оттаивании, как правило, достигают величин, значительно превосходящих допускаемые.

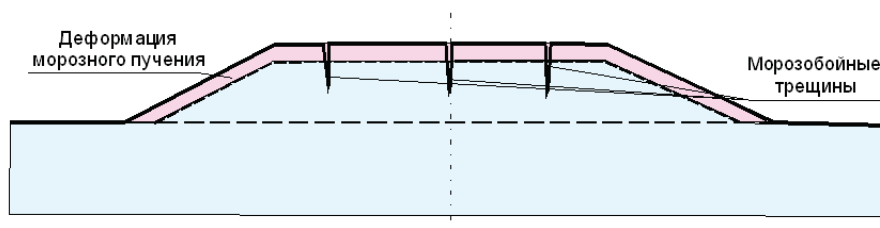


Рис. 4. Деформации замороженной насыпи

Выводы

- Анализ первого и второго принципов проектирования указывает на невозможность их применения для обоснования конструкций насыпей и стадийной организации строительства дорог на мерзлоте.
- Применение сухо- и сыпучемерзлых грунтов в теле насыпи не обеспечивает положение верхней границы мерзлоты выше подошвы земляного полотна.
- Разработка ресурсосберегающих конструкций земляного полотна на основе местных грунтов и геосинтетических материалов позволит разработать механизм управления водно-тепловым режимом насыпей на мерзлоте с большой степенью надежности.

Библиографический список

1. Шуваев А. Н. Земляное полотно из мерзлых грунтов. – М.: Недра, 1997. – 155 с.
2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. I. – 464 с.

3. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
4. Пузаков Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна и автомобильных дорог. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 168 с.
5. Казарновский В. Д. Пути повышения надежности долговечности дорог в сложных природных условиях // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2002. – № 2. – С. 92–93.
6. Линцер А. В. Пути повышения качества и эффективности дорожного строительства в нефтепромысловых районах Западной Сибири // Нефтепромысловое строительство. – 1977. – № 7. – С. 31–33.
7. Konrad J. M., Morgestern N. R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils // Canadian Geotechnical Journal. – 1980. – Vol. 17, Issue 4. – P. 473–486. DOI: 10.1139/t80-056
8. Konrad J. M., Morgestern N. R. Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils. – Canadian Geotechnical Journal. – 1984. – Vol. 21, Issue 4. – P. 100–115. DOI: 10.1139/t84-008
9. Замятин А. В., Шуваев А. Н. Результаты исследований грунтовых массивов возведенных в зимний период при замораживании и оттаивании // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 2. – С. 91–94.
10. Шуваев А. Н., Маслов Д. В. Макетные испытания грунтовых насыпей // Строительный вестник Тюменской области. – 2012. – Вып. 3 (61). – С. 87–88.
11. Шуваев А. Н., Панова М. В., Пульдас Л. А. Информационная технология инженерного обеспечения надежности дорожных конструкций в условиях севера // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 110–124. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-110-124
12. Шуваев А. Н., Панова М. В. Надежность и долговечность автомобильных дорог в сложных природных условиях // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог: сборник научных трудов ОАО «ГИПРОДОРНИИ». – 2013. – Вып. 4 (63). – С. 14–19.
13. Shuvaev A. N., Panova M. V. Improving The Efficiency of Reinforced Soil When Constructing Road Transport Facilities // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, Issue 7. – P. 507–512.
14. Шуваев А. Н. Перспективные транспортные конструкции и технологии при обустройстве месторождений // Строительный вестник Тюменской области. – 2012. – № 3 (61). – С. 45.
15. Шуваев А. Н. Физико-математическое моделирование грунтовых насыпей из мерзлых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 5. – С. 167–173.

References

1. Shuvaev, A. N. (1997). Permafrost roadbed. Moscow, Nedra Publ., 155 p. (In Russian).
2. Nigmatulin, R. I. (1987). Dinamika mnogofaznykh sred. CHast' I. Moscow, Nauka Publ., 464 p. (In Russian).
3. Tsytoovich, N. A. (1973). Mekhanika merzlykh gruntov. Moscow, Vysshaya shkola, 448 p. (In Russian).
4. Puzakov, N. A. (1960). Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i avtomobil'nykh dorog. Moscow, Avtotransizdat Publ., 168 p. (In Russian).
5. Kazarnovskiy, V. D. (2002). Puti povysheniya nadezhnosti dolgovechnosti dorog v slozhnykh prirodnnykh usloviyakh. Science and Engineering for Highways, (2), pp. 92-93. (In Russian).
6. Lintser, A. V. (1977). Puti povysheniya kachestva i effektivnosti dorozhnogo stroitel'stva v neftepromyslovykh rayonakh Zapadnoy Sibiri. Neftepromyslovoe stroitel'stvo, (7), pp. 31-33. (In Russian).
7. Konrad, J. M., & Morgestern, N. R. (1980). A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 17(4), pp. 473-486. (In English). DOI: 10.1139/t80-056
8. Konrad J. M., & Morgestern, N. R. (1984). Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils. – Canadian Geotechnical Journal, 21(4), pp. 100-115. (In English). DOI: 10.1139/t84-008
9. Zamyatin, A. V., & Shuvaev, A. N. (2011). Results of researches of soil files erected during the winter period at freezing and thawing. Scientific and Technical Volga region Bulletin, (2), pp. 91-94. (In Russian).

10. Shuvaev, A. N., & Maslov, D. V. (2012). Maketnye ispytaniya gruntovykh nasypey. *Stroitel'nyy vestnik Tyumenskoy oblasti*, (3(61)), pp. 87-88. (In Russian).
11. Shuvaev, A. N., Panova, M. V., & Poldas, L. A. (2017). Information Technologies of Engineering Maintenance of Reliability of Road Constructions in the Conditions of the North. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 3(3), pp. 110-124. (In Russian). DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-110-124
12. Shuvayev, A. N., & Panova, M. V. (2013). Reliability and durability of highways in difficult environmental conditions. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avto-mobil'nykh dorog: sbornik nauchnykh trudov OAO "GIPRODORNII"*, (4(63)), pp. 14-19. (In Russian).
13. Shuvaev, A. N., & Panova, M. V. (2018). Improving The Efficiency of Reinforced Soil When Constructing Road Transport Facilities. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), pp. 507-512. (In English).
14. Shuvaev, A. N. (2012). Perspektivnye transportnye konstruksii i tekhnologii pri obustroystve mestorozhdeniy. *Stroitel'nyy vestnik Tyumenskoy oblasti*, (3(61)), p. 45. (In Russian).
15. Shuvaev, A. N. (2016). Physical and Mathematical simulation of Frozen soil Embankments. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*, (5), pp. 167-173. (In Russian).

Сведения об авторах

Шуваев Анатолий Николаевич, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: anshuvaev46@mail.ru

Панова Марина Владимировна, к. т. н., доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Картавый Сергей Васильевич, директор департамента ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Тюмень

Information about the authors

Anatoly N. Shuvaev, Doctor of Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, e-mail: anshuvaev46@mail.ru

Marina V. Panova, Candidate of Engineering, Associate Professor, Industrial University of Tyumen

Sergey V. Kartavy, Department Director, Gazpromneft NTC LLC, Tyumen